



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

KIMMO JULKU

AALLOTETTUIJEN TERÄSPUTKISILTOJEN SUUNNITTELUOH-
JEEN PÄIVITTÄMINEN EUROKOODIEN MUKAISEKSI

Diplomityö

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg
Tarkastaja ja aihe hyväksytty:
Rakennetun ympäristön tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 4. touko-
kuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

JULKU, KIMMO: Aallotettujen teräsputkisiltojen suunnitteluohjeen päivittäminen eurokoodien mukaiseksi

Diplomityö, 53 sivua, 15 liitesivua

Syyskuu 2011

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg, Tekn. lis. Torsten Lunabba

Avainsanat: Putkisilta, väsyminen, eurokoodi

Suomen siirtyminen yhteiseurooppalaiseen eurokoodi mitoitusstandardiin on luonut tarpeen päivittää yksittäisiä soveltamisohjeita. Tämän diplomityön on tarkoitus olla osa hanketta, missä päivitetään Tiehallinnon vuonna 2008 julkaisemaa Teräsputkisillat ohjetta. Liikennevirasto julkaisee vuoden 2011 aikana päivitetyn version Teräsputkisillat ohjeesta.

Diplomityössä on kaksi toisistaan selkeästi eroavaa osaa: staattinen mitoitus ja väsymistarkastelut. Työn ensimmäisessä osassa on perehdytty maahan upotetun aallotetun teräsputkisillan staattiseen mitoitukseen ja tutkittu eurokoodien tuomia muutoksia tähän osaan. Teräsputkisillan väsymisilmiön tutkiminen oli lähtökohdiltaan hieman erilainen. Työtä aloitettaessa oli tiedossa väsytysmitoitukseen tulleet radikaalit muutokset, joiden uskottiin johtavan aiempaa ankarampaan mitoitukseen teräsputkisilloissa, jotka suunnitellaan matalalla peittosyvyydellä.

Työn aikana on tehty lukuisia vertailulaskelmia, joiden avulla on voitu etsiä ongelmakohtia. Tässä diplomityössä on esitetty vertailulaskelmista ainoastaan vertailut edellisen suunnitteluohjeen ja tulevan uuden suunnitteluohjeen lopullisen version välillä. Vertailulaskelmien perusteella voidaan todeta staattisen mitoituksen menneen kokonaisuudessaan kevyempään suuntaan. Teräsputkisilloilla, jotka on rakennettu matalalla peittosyvyydellä, väsytysmitoitus muuttuu edelliseen ohjeeseen verrattuna huomattavasti kriittisemmäksi.

Työn aikana huomattiin, että liitoksen toimintaa olisi syytä tutkia tarkemmin. Suurilla teräsputken dimensioilla liitoksen rasitukset yleensä mitoittavat teräsputken. Tähän projektiin ei ollut mahdollista sisällyttää tarkempaa liitoksen toiminnan tutkimusta. Mahdollisia jatkotutkimuksia varten on tämän diplomityön liitteessä esitetty koejärjestely, millä voidaan tutkia liitoksen toimintaa tarkemmin.

Tulevaan suunnitteluohjeeseen on sisällytetty myös suuret kehämäiset teräsputkisillat, ns. Box Culvert siltatyypin. Ohjeistus tämän siltatyypin mitoitukseen on tehty lähinnä ruotsalaisen mitoituskäytännön mukaan. Tähän diplomityöhön ei ole sisällytetty näiden mitoituskäytäntöjen kriittistä tarkastelua, vaikka sellainen olisi erittäin tarpeellinen. Mitoitusmenetelmistä ei ole tuotesalaisuuteen vedoten yksityiskohtaisempia tarkasteluita.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

JULKU, KIMMO: Upgrading the Design Guidelines of Corrugated Steel Culverts in compatibility with Eurocodes

Master of Science Thesis, 53 pages, 15 Appendix pages

September 2011

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Ralf Lindberg, Tekn. lic. Torsten Lunabba

Keywords: Corrugated steel pipe, fatigue, Eurocodes

Finland has been in transition state into time where all structural engineering has to be done with Eurocodes. This Master's thesis will be a part of research which will give information for Finnish transport agency to upgrade design guide for corrugated steel culverts. Previous guide has been published in 2008.

Master's thesis is divided in two separate sections: static and fatigue inspections. The first part of thesis concentrates on changes that Eurocodes demand on static dimensioning of buried corrugated steel culverts. The second part of thesis concentrates on fatigue dimensioning of corrugated steel culverts. In the beginning of the project it was known that principles for fatigue dimensioning will change a lot compared to previous design guidelines.

Several comparison calculations were done during the project. Those helped to find blackspots in guidelines. In this Master's thesis is presented only comparison with the previous and the latest version of new design guidelines. Based on this comparison there can be noticed that utilization rates are more dominating when designing has been done with previous standards. Fatigue designing will be more critical than it used to be, if the cover height of the culvert is low.

During the project it was noticed that the joint action would be appropriate to examine in more detail. This project was not possible to include further research activities for joints. For possible further investigations there is possible arrangement for testing the operation of joint. This arrangement is presented in annex 4.

Upcoming design guidelines will include also the instructions for designing larger flat arcs, so-called Box-culverts. These instructions are mostly based on Swedish design guidelines. There is hardly any research work of Box-culverts in this Master's thesis, even though this would be very necessary. Privacy policies of Destia Oy forbids to present detailed design methods in this Master's thesis.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitokselle. Työn tarkoituksena on ollut tuottaa pohjatietoa Liikenneviraston Teräspankikisiltojen suunnitteluohjeen päivitystä varten.

Diplomityö on osa Teräspankikisiltojen suunnitteluohjeen päivitysprojektia. Projektin työryhmään on kuulunut Liikenneviraston, putkisiltatoimittajien ja Destia Oy:n edustajia. Heidän kaikkien panosta on tarvittu tämän projektin onnistumisen takaamiseksi.

Tämän diplomityön tarkastajana on toiminut Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen professori Ralf Lindberg. Diplomityön toisena tarkastajana ja ohjaajana on toiminut tekn. lis. Torsten Lunabba Destia Oy:stä.

Korvaamatonta apua olen henkilökohtaisesti saanut Torsten Lunabbalta ja Antti Jusilalta. Molemmat heistä ovat ansainneet kiitokseni ja lisäksi haluan toivottaa Torstenille mukavia eläkepäiviä.

Tampereella 16.9.2011

Kimmo Julku

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
1.1	Yleistä	1
1.2	Ohjeen päivitystarpeet.....	1
2	Staatinn mitoitut.....	3
2.1	Periaatteet.....	3
2.2	Eurokoodin tuomat muutokset	3
2.2.1	Tieliikennesiltojen kuormat	3
2.2.2	Raideliikennesiltojen kuormat	5
2.2.3	Kevyen liikenteen väylät ja kuormittamaton putki	6
2.2.4	Varmuuskertoimet ja kuormien yhdistelmät teräspukisilloissa	7
2.3	Rakennanalyysi	10
2.3.1	Yleistä	10
2.3.2	Yhdistetyt rasitukset.....	10
2.4	Liitokset	12
2.4.1	Lujuudet ja varmuuskertoimet	12
2.4.2	Liitoksen toiminta ja kitkan hyödyntäminen	14
2.4.3	Vetorasitus	15
2.4.4	Leikkausrasitus.....	16
2.4.5	Yhdistetyt rasitukset.....	17
2.4.6	Reunapuristus	17
2.5	Eurokoodin tuomat epävarmuustekijät	18
2.6	Yhteisvaikutuskaavan tutkiminen	19
2.6.1	FEM-malli	19
2.6.2	FEM-mallin herkkyytstarkastelu.....	22
2.6.3	Täysplastisen momentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus.....	23
2.6.4	Vertailulasketmat ja johtopäätökset	24
3	Väsyttymitotus.....	26
3.1	Väsymisilmiö	26
3.2	Väsymiskestävyyden arviointi	27
3.3	Oikean kuormakaavion valinta	27
3.3.1	Tieliikenteen väsyttyskuorma	27
3.3.2	Raideliikenteen väsyttävä kuorma	30
3.4	Jännittsvaihteluvälin syntyminen	31
3.4.1	Putkisillan päällä oleva ajoneuvo.....	31
3.4.2	Lopullinen jännittsvaihtelu.....	34
3.5	Rakenneteräksen mitotus	34
3.6	Pulttiliitoksen mitotus	34
3.7	Yksinkertaistettu laskentamenetelmä ajoneuvoliikenteen väsyttävälle kuormille	35

4	Mitoitusmenetelmät suunnitteluohjetta varten	45
4.1	Suunnittelun lähtötiedot	45
4.2	Staattinen mitoitus.....	46
4.2.1	Rakenneteräs	46
4.2.2	Pulttiliitokset	46
4.3	Väsymismitoitus.....	46
4.3.1	Tieliikenteen putkisillat.....	46
4.3.2	Raideliikenteen putkisillat.....	47
5	Yhteenveto	49
5.1	Vertailulaskelmat	49
5.1.1	Lähtötiedot	49
5.1.2	Tulokset.....	49
5.2	Poikkeavuudet Eurokoodeista.....	50
5.3	Jatkotutkimustarpeet	50
	Lähteet.....	52

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

$\Delta\sigma_C$	Väsymisluokka [MPa]
$\Delta\sigma_D$	Vakioamplitudinen väsymisraja [MPa]
$\Delta\sigma_L$	Alempi väsymisraja [MPa]
f_u	Vetomurtolujuus [MPa]
f_y	Myötölujuus [MPa]
h_c	kts. peitesyvyys
$h_{c,red}$	kts. redusoitu peitesyvyys
M_d	Taivutusmomentin mitoitusarvo [kNm/m]
$M_{y,Rd}$	Taivutusmomentin kestävyysmitoitussarvo [kNm/m]
N_{cr}	Brutto poikkileikkauksen ominaisuuksiin perustuva kyseen tulevan nurjahdusmuodon kimmoteorian mukainen kriittinen kuorma.
N_d	Normaalivoiman mitoitusarvo [kN/m]
$p_{traffic}$	kts. Ekvivalentti viivakuorma [kN/m]
σ_v	Maan vertikaali jännityskomponentti [MPa]
Alempi väsymisraja	Jännitysraja, jonka alapuolella rakenne kestää äärettömän määrän kuormitussyklejä (SFS-EN 1993-1-9)
Box-culvert	Teräspuutkissillan erikoissovellutus
Ekvivalentti viivakuorma	Laskennallinen tietä vasten kohtisuorassa oleva viivakuorma [kN/m] (Teräspuutkissillat 2008)
FEM	Elementtimenetelmä
Kierresaumattu putki	Putkirakenne, joka on valmistettu teräsnauhasta saumaamalla tai hitsaamalla
Monilevyrakenne	Useasta levystä pulteilla koottu teräspuutkissiltarakenne
Peitesyvyys	Putkissillan laen yläpinnan etäisyys ylittävän väylän pinnasta tai radan kv:sta [m]
Putken taivutusmomentti	Tässä diplomityössä positiivisella taivutusmomentilla tarkoitetaan taivutusmomenttia joka venyttää profiilin putken sisäpuoleisia huippuja. Negatiivinen taivutusmomentti venyttää putken ulkopuolisia huippuja.
Putkisilta	Maahan upotettu aallotettu teräsputki tai holvi, joka toimii yhteisvaikutuksessa maan kanssa siltana. Putken jännemitta on vähintään 2 metriä.
Redusoitu peitesyvyys	Peitesyvyys redusoidaan mitoitusarvo varten huomioimalla täyttötöyöstä johtuva teräspuutken laen nousu
SCI-menetelmä	Soil Culvert Interaction –method, teräspuutken ja täyttömaan yhteisvaikutukseen perustuva mitoitusmenetelmä (Duncan 1978 ja 1979)

Telikuorma	Kahden tai useamman akselin yhdistelmä, missä akseleiden välinen etäisyys on korkeintaan 1,3 metriä (etäisyys koskee ainoastaan tätä diplomityötä)
Vakioamplitudinen väsymisraja	Jännitysvaihtelun raja-arvo, jonka alapuolella ei esiinny väsymisvaurioita vakioamplitudisella jännitysvaihtelulla. Vaihtuva amplitudisessa jännitysvaihtelussa kaikkien jännitysvaihteluiden pitää alittaa tämä raja, että väsymisvaurioita ei esiinny (SFS-EN 1993-1-9)
Väsymisluokka	Rakenneyksityiskohdan annettu kestävyysluku, joka vastaa kahden miljoonan jännityssyklin kestävä jännityksen vaihteluväliä (SFS-EN 1993-1-9)
Yhteisvaikutuskerroin	Kerroin jolla huomioidaan normaalivoiman ja taivutusmomentin samanaikaista vaikutusta.

1 JOHDANTO

1.1 Yleistä

Yhteiseurooppalainen päätös siirtyä käyttämään Euroopan Unionin alueella yhteisiä mitoitusperusteita rakennesuunnittelussa on aiheuttanut tarpeen päivittää Suomalaisia mitoitusohjeita.

Aallotettujen teräsputkien suunnitteluohje on yksi ensimmäisistä kansallisista soveltamisohjeista, joita on alettu tehdä eurokoodien astuttua voimaan siltojen suunnittelussa 1.6.2010. Tätä diplomityötä kirjoittaessa ja suunnitteluohjetta laadittaessa oli aiemmin julkaistu vain kolmen osa-alueen kansalliset soveltamisohjeet. Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet oli julkaistu jo ennen tämän työn aloittamista. Edellä mainitun ohjeen lisäksi tämän työn aikana ilmestyivät kansalliset soveltamisohjeet siltojen betonirakenteiden ja geotekniikan suunnitteluun.

Tämän työn kannalta on ollut hyötyä siitä että muut soveltamisohjeet eivät ole olleet valmiina. Sen ansiosta on työryhmälle jäänyt vapaammat kädet pureutua putkisiltojen suunnittelua koskeviin epäkohtiin, joita on tullut vastaan ohjeen päivityksen edetessä. Kääntöpuolena muiden soveltamisohjeiden puuttumiselle on lisääntynyt työmäärä liittyen yleisiin linjan vetoihin eurokoodien soveltamisessa.

Työn edetessä huomattiin alkuperäisen projektisuunnitelman olevan liian suppea. Projektin suurimmat laajennukset koskivat väsytsmitoitusta ja maahan upotetun teräsputken yhdistettyä normaalivoima- ja taivutusmomentti kestävyyttä. Väsytsmitoitus jouduttiin lopulta tekemään laajemman FLM4-kuormakaavion mukaan, kun alkuperäinen suunnitelma oli käyttää väsytskuormakaaviota FLM3. Eurokoodin mukaisen yhdistettyjen rasisusten interaktiokaavan todettiin olevan liian ankara maahan upotetun teräsputken mitoitukseen.

1.2 Ohjeen päivitystarpeet

Vuonna 2010 koko Euroopassa otettiin käyttöön yhteinen rakennesuunnittelun eurokoodi-standardi. Joiltakin osin eurokoodit ovat olleet julkaistuna ja yli kymmenen vuotta, mutta niiden käyttöä ei ollut velvoitettu Suomessa ennen viime vuotta. Uuden standardin käyttöönotto loi tarpeen luoda uusia ja päivittää vanhoja soveltamisohjeita.

Edellinen Teräsputkisiltojen suunnitteluohje on julkaistu 2008. Sitä varten on diplomi insinööri Antti Jussila tehnyt diplomityön 2007, missä pääosin käsitellään aallotetun teräsputkisillan staattista rakenneanalyysiä ja mitoitusperusteita. Vanhentuva ohje ja edellä mainittu diplomityö pohjautuvat pääosiltaan ruotsalaiseen tekniikan tohtori Lars Petterssonin tekemään väitöskirjaan: Full Scale Tests and Structural Evaluation of Soil

Steel Flexible Culverts with low Height of Cover (2007). Saman väitöskirjan perusteilla Pettersson on julkaissut teräspankksiltojen suunnitteluohjeen, Design of soil steel composite bridges (2010). Edellä mainitussa julkaisussa on tehty joitakin päivityksiä teräspankksen mitoitusperusteisiin. Rakenteen staattisessa mitoituksessa on perusteet otettu suoraan eurokoodi teräspankasta, mutta aallotetun teräspankiin yhteistoiminta maan kanssa poikkeaa perinteisistä lujuusopin olettamuksista. Petterssonin julkaisemassa suunnitteluohjeessa ei myöskään ole perehdytty tarkemmin teräspankisillan väsymismitoitukseen ja sen optimointiin.

Teräspankisiltojen suunnitteluohjeen päivittämistä varten perustettiin työryhmä syksyllä 2010, johon kuului mm. Liikenneviraston ja pankisiltatoimittajien edustajia. Työryhmän tavoitteena oli julkaista ohje aallotettujen teräspankisiltojen eurokoodin mukaiseen suunnitteluun. Yhtenä projektin lähtökohdista oli taata teräspankisiltojen kilpailukyky verrattuna muihin saman kokoluokan siltoihin, mutta niille ei kuitenkaan haluttu antaa erivapauksia suunnittelussa. Osana tämän työryhmän aineistoa toimi tämä diplomaatio, jossa pyritään selvittämään perusteet teräspankisillan eurokoodien mukaiselle mitoitukselle ja luomaan käyttökelpoinen väsymismitoitustmenetelmä.

2 STAATTINEN MITOITUS

2.1 Periaatteet

Teräspankisillan mitoituksen peruseriaatteisiin ei ole tullut muutoksia eurokoodiaikaan siirtymisestä huolimatta. Mitoitus tehdään edelleen erilaisten kuormakaavioiden pohjalta, mutta mitoitussajoneuvojen akseliden painoihin ja sijoitteluun on tullut muutoksia. Liikennekuormien ominaisarvot ovat suurempia kuin ennen, mutta murtorajatila mitoituksessa asiaa kompensoi pienemmät kuormien osavarmuuskertoimet kuin aiemmin.

Rakenteellista mitoitusta varten lasketaan ekvivalentti viivakuorma, p_{traffic} , putken laella. Tämän teoreettisen viivakuorman avulla tehdään teräspankisillan ja sen liittosten rakenteellinen mitoitus. Teräspankisillat -ohjeessa (2008) on esitetty miten p_{traffic} -arvo lasketaan, käyttämällä Boussinesqin menetelmällä saatuja kuorman intensiteettejä syvyydellä z . Teräspankisiltojen suunnittelussa syvyys z on teräspankputken redusoitu peitesyvyys (Teräspankisillat 2008).

$$p_{\text{traffic}} = \frac{\pi \cdot z}{2} \cdot \sigma_v \quad (2.1)$$

missä

z on tarkasteltava syvyys. Yleensä $z = h_{c,\text{red}}$ [m]

σ_v on vertikaali jännityskomponentti maassa syvyydellä z [MPa]

Vaikka teräspankisillan mitoituksen peruseriaatteet eivät ole muuttuneet, on teräsprofiilin kestävyuden tarkistamisen periaatteisiin tullut muutoksia. Mitoitus perustuu edelleen kriittisen poikkileikkauksen tarkasteluun ja normaalivoiman, sekä momentin yksittäis- ja yhteisvaikutusten tarkasteluun. Tähän asiaan perehdytään tarkemmin luvussa 2.3 Rakenne analyysi.

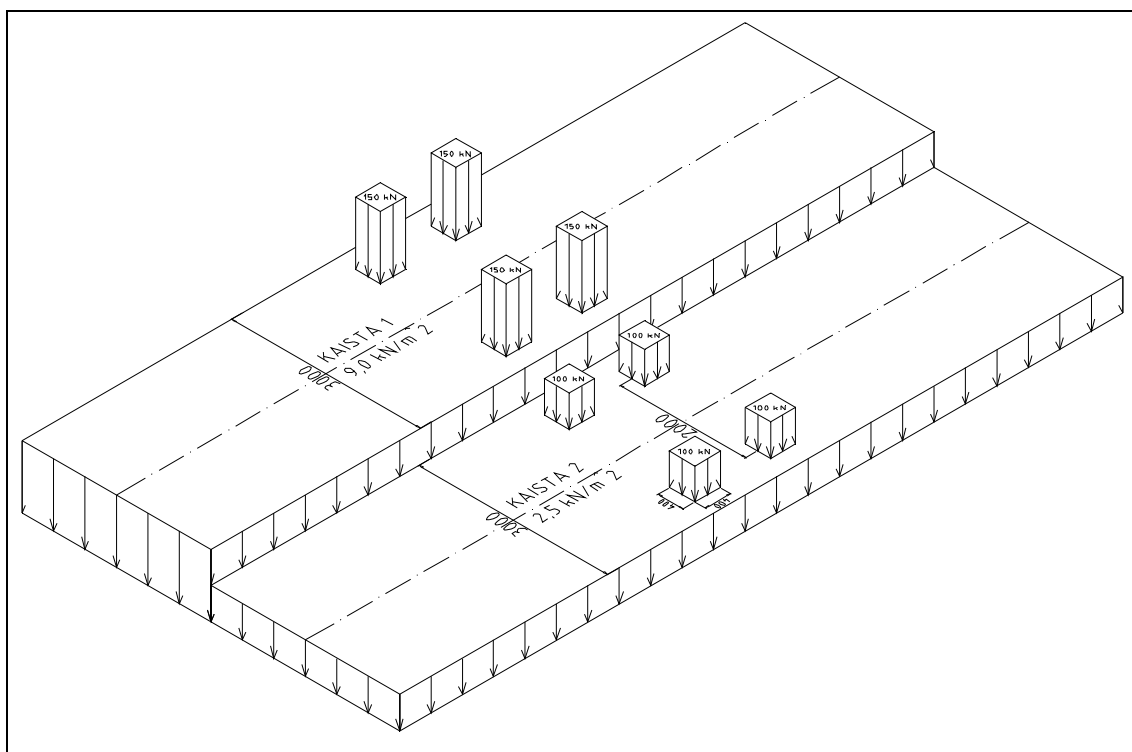
2.2 Eurokoodin tuomat muutokset

2.2.1 Tieliikennesiltojen kuormat

Teräspankisiltoja, ja kaikkia muitakin siltoja, koskevat liikennekuormat on esitetty Liikenneviraston julkaisemassa eurokoodin soveltamisohjeessa Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet (2010). Kaikissa siltahankkeissa, jotka ovat alkaneet kesäkuun 2010 jälkeen, on pitänyt käyttää edellä mainitun soveltamisohjeen mukaisia suunnitteluperusteita. Tässä julkaisussa on esitetty neljä (4) erilaista tieliikenteen siltojen kuormakaaviota. Kuormituskaaviot on nimetty LM1...LM4. Vanhoihin suunnitteluperusteisiin verrattuna eurokoodin soveltamisohjeen ajoneuvokuormien ominaisarvot ovat kasvaneet.

Kuormakaavioilla kuvataan erityyppisiä kuormitustilanteita sillalla. Siltaa suunniteltaessa on sen jokainen osa mitoitettava määräävälle kuormayhdistelmälle (Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet 2010). Teräsputkisillan tapauksessa osilla tarkoitetaan varsinaista teräsputkea ja sen eri alueita, sekä liitoksia. Kuormakaavioissa on huomioitu dynaaminen suurennusvaikutus ja ne koostuvat jatkuvasta tasaisesta kuormasta, sekä ajoneuvojen akselien pistekuormista. Kaaviot sijoitetaan sillalle sillansuuntaisille kolme (3) metriä leveille kuormakaistoille (emt.). Kuormakaistojen käytössä on noudatettava kuormituskaaviokohtaisia ohjeita.

Kuormakaavio LM1 muodostuu kuormakaistoittain olevasta tasaisesta kuormasta ja telikuormasta. Kuormien arvot ja pyöräkuormien kosketusalat on esitetty kuvassa 2.1. Teräsputkisiltoja mitoitettaessa ei tarvitse huomioida kuin kaksi kuormakaistaa, koska suurin vertikaalijännitys maassa on aina kuormakaistan ensimmäisen akselin kohdalla, tai akselien välissä. Teräsputkisiltaa mitoitettaessa voidaan olettaa akselien olevan aina keskellä kuormakaistaa. Telikuormien sijoittumista kuormakaistan poikkisuunnassa ei tarvitse tutkia, koska teräsputkisilloissa ei ole erikseen mitoitettavia yksityiskohtia joiden mitoitukseen asia vaikuttaisi. Kuormakaavioille LM1 on käytössä pienennyskerroimet α_{qi} ja α_{Qi} , joilla voidaan pienentää valtionapua saavien yksityisteiden siltojen kuormia (emt.).



Kuva 2.1. Kuormakaavio LM1 (Julku 2011)

Kuormakaavio LM2 on raskas akselikuorma, jonka kokonaispaino on 400 kN. Akseli sijoitetaan kuormakaistoille, mutta useampaa kuin yhtä akselia ei tarvitse kerralla huomioida. Pyöräkuorman kosketuspinta on suorakulmio, jonka mitat ovat 0,35·0,60 m² (emt.). Vanhassa Siltojen kuormat -ohjeessa (1999) on vastaavanlainen raskas akseli-

kuorma, mutta sen kokonaispaino on vain 260 kN. Tämän 140 kN eron vaikutus mitoitukseen matalilla peitesyvyyksillä esitetään myöhemmin tässä diplomityössä. Myös kuormakaavioille LM2 voidaan käyttää pienennyskerrointa valtionapua saavissa silloissa (Siltujen kuormat ja suunnitteluperusteet 2010). Tämän kuormakaavio voidaan olettaa mitoitettavan lähes kaikki matalalle peitesyvyydelle rakennettavat putket.

Kuormakaaviota LM3 käytetään raskaiden kuljetusten reitillä olevien siltujen suunnittelussa. Myös asianomainen viranomais voi määrätä tämän kuormakaavio käyttöön. Tämä kaavio vaikuttaa vain yhdellä kuormakaistalla kerrallaan. Kuormana on 45 kN/m² pintakuorma (emt.). Tällä kaaviolla tehdään ainoastaan murtorajatilan mitoitus.

Kuormakaavio LM4 on tungoskuorma, jonka suuruus on 5 kN/m². Myös sen käytöstä määrätään hankekohtaisesti. Tätä kuormakaaviota tarvitaan ainoastaan, kun teräsputkisilta mitoitetaan kevyenliikenteen siltana.

Jarrukuorman vaikutuksesta teräsputkisilta on raportoituja tutkimuksia tehty vain muutama; Temporal et al. (1985) ja Flener (2005). Kummassakin tutkimuksessa on todettu jarrukuormien vaikutuksen haudattuun teräsputkeen olevan minimaalinen. (Pettersson 2007.)

Siltujen kuormat ja suunnitteluperusteet -ohjeen mukaan kuormien samanaikaista vaikutusta tutkitaan kuormaryhmillä. Kuormaryhmien käyttö ei putkisiltujen mitoituksessa ole tarpeellista, koska pysyvien ja liikennekuormien lisäksi mitoituksessa ei oteta muita kuormia huomioon.

2.2.2 Raideliikennesiltujen kuormat

Raideliikenteen aallotetut teräsputkisillat mitoitetaan Siltujen kuormat ja suunnitteluperusteet -ohjeen (2010) kuormakaavioille LM71, SW/0 ja SW/2. Nämä kuormakaaviot ovat staattisia ja niihin on lisättävä dynaaminen suurennus Φ_2 (emt.). Dynaaminen suurennus lasketaan kaavalla 2.2.

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi} \cdot 0,2} + 0,82 \quad (2.2)$$

missä

L_Φ on putkisillan halkaisija [m]

Sysäyskertoimen raja-arvot ovat:

$$1,00 \leq \Phi_2 \leq 1,67 \quad (2.3)$$

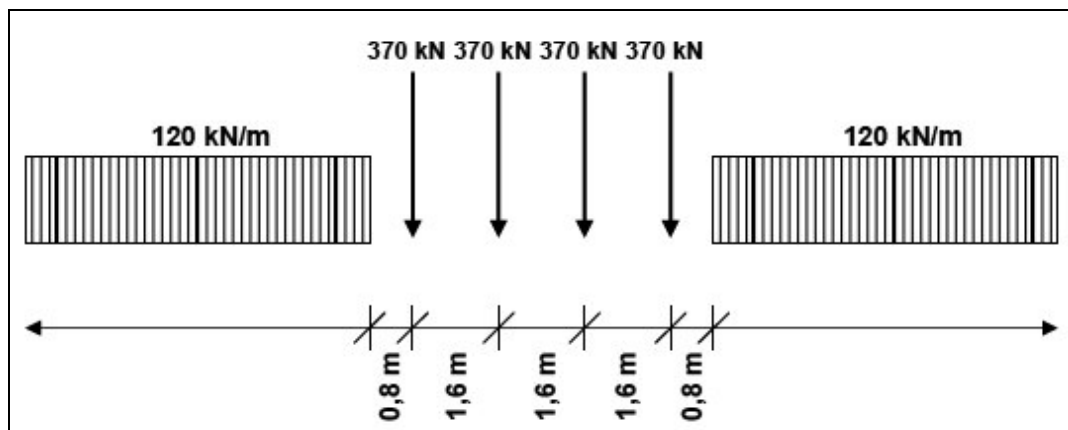
Dynaamiseen suurennuskertoimeen voidaan tehdä peitesyvyydestä riippuva pienennys, kun peitesyvyys on enemmän kuin 1,0 m (emt.). Lopullinen dynaaminen suurennuskerroin on kaavan 2.4 mukainen.

$$\Phi_r = \Phi_2 - \frac{h_{c,red} - 1,0}{10} > 1,0 \quad (2.4)$$

missä

$h_{c,red}$ on redusoitu peitesyvyys ratapölkyn alapinnasta [m]

Staattisista kuormakaavioista LM71 pitää luokitella. Luokittelu tapahtuu kertoimella 1,46. Luokitellun kuormakaavion LM71-35 akselipainot ja tasaisen kuorman arvo on esitetty kuvassa 2.2. Muita staattisia kuormakaavioita ei luokitella.



Kuva 2.2. Luokiteltu kuormakaavio LM71-35 (Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet 2010)

Junakuormien akselikuormien oletetaan jakautuvan pölkkyjen välityksellä maahan, siten että 50 % akselikuormasta tulee akselin alla olevalle pölkylle ja 25 % viereisille pölkkyille (Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet 2010). Suunnitteluohjeen mukaan maarakenteita mitoitettaessa junakuorma voidaan olettaa yli 500 mm:n peitesyvyyksillä tasaisesti jakautuneeksi. Tällöin ei myöskään dynaamista suurennuskerrointa tarvitsisi ottaa huomioon (emt.). Vaikka aallotettu teräsputki toimiikin yhdessä maan kanssa, ei sitä voida pitää puhtaana maarakenteena ja siksi dynaaminen suurennuskerroin tulee aina huomioida. Rakenteellisessa mitoituksessa voidaan olettaa akseleiden vaikuttavan tasaisena kuormana, sillä etäisyys putken laesta ratapölkyn alapintaan on aina yli 1,2 m. Suunniteltaessa teräsputkisiltaa jonka ylittää useampi kuin yksi (1) raide, pidetään määrävän raiteen keskilinjalla olevaa poikkileikkausta mitoitettavana (Teräsputkisillat 2008).

Muut soveltamisohjeen Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet mukaiset juna-kuormat ovat SW/0, SW/2 ja kuormittamaton juna. Teräsputkisiltaja ei tarvitse mitoitaa näille kuormakaavioille, koska ne on tarkoitettu käytettäväksi jatkuvien rakenteiden mitoitukseen tai niiden intensiteetti on pienempi kuin kuormakaavion LM71.

Raideliikenteen siltojen kuormien murtorajatilan laskenta-arvot ovat pienemmät kuin vanhassa ohjeessa. Junien akseli- tai tasaisiin pinta-alakuormiin ei ole tullut muutoksia, mutta kuormien osavarmuuskertoimet ovat pienentyneet.

2.2.3 Kevyen liikenteen väylät ja kuormittamaton putki

Kevyen liikenteen väylän alle rakennettava aallotettu teräsputkisilta voidaan suunnitella Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet -ohjeen (2010) mukaisille kevyenliikenteen kuormille. Mitoituksessa pitää huomioida tasaisesti jakautunut ja pistekuorma, sekä huoltoajoneuvon kuorma. Tasaisena kuormana käytetään kuormakaavion LM4 tungos-

kuorman arvoa 5 kN/m^2 . Kestävyys tarkastetaan pelkän tasaisen kuorman lisäksi kaksiakseliselle huoltoajoneuvolle, jonka akseleiden painot ovat 80 kN ja 40 kN . Jos sillalle ei pääse huoltoajoneuvolla, lasketaan kestävyys pistekuormalle, jonka paino on 20 kN ja kosketusala on $0,2 \cdot 0,2 \text{ m}^2$. Kahden viimeksi mainitun kuorman p_{traffic} -arvot on laskettu liitteen 3 kuviin L3.1 ja L3.2.

Kevyen liikenteen teräspankksiltaa ei ole helppo huomata maastossa. Tämän takia on suositeltavaa suunnitella kaikki kevyen liikenteen teräspankksillat samoilla suunnittelu-perusteilla kuin valtion apua saavat yksityisteiden teräspankksillat.

Teräspankkti- tai vastaava silta voidaan rakentaa paikkaan minne ei ole liikenteellä pääsyä. Tällöin mitoitns tehdään ainoastaan rakennusaikaiselle tilanteelle ja maan painoille. Kaikkien kuormiltaan poikkeavien teräspankkti- tai vastaavien siltojen mitoitns-kuormat pitää sopia erikseen valvovan viranomaisen kanssa. Erilaisia aallotettujen teräspankksiltojen sovellutuksia voidaan tietyillä varauksilla suunnitella tässä diplomityössä esitellyillä perusteilla.

2.2.4 Varmuuskertoimet ja kuormien yhdistelmät teräspankksilloissa

Teräspankksiltojen suunnittelussa käytetyt kuormien ja materiaalien osavarmuuskertoimet on koottu taulukkoon 2.1. Tässä taulukossa on esitetty myös aikaisemmin käytössä olleet kertoimet. Kaikki osavarmuuskertoimet ovat soveltamisohjeen Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet tai standardien SFS-EN 1993-1-1, 1993-1-8 ja 1993-1-9 mukaisia. Perustelut osavarmuuskertoimien muutoksille on esitetty tässä diplomityössä.

Taulukko 2.1. Osavarmuuskertoimet (Julku 2011)

Kuormakertoimet		Eurokoodi	Vanha ohje
Pysyvä kuorma, käyttörajatila	γ_{gk}	1	1
Pysyvä kuorma, murtorajatila	γ_{gd}	1,15 tai 0,9	1,2 tai 0,9
Liikennekuorma, käyttörajatila	γ_{pk}	1,0 tai 0	1,0 tai 0
Tiesillan liikennekuorma, murtorajatila	γ_{pd}	1,35 tai 0	1,8/1,4* tai 0
Tiesillan liikennekuorma, väsytyksrajatila	γ_{Ff}	1,0	$(0,4 - 0,02 \cdot D / m) \geq 0,25$
Raideliikenteen sillan liikennekuorma, murtorajatila	γ_{pd}	1,45 tai 0	1,6 tai 0
Raideliikenteen sillan liikennekuorma, väsytyksrajatila	γ_{Ff}	1,0	$1,8 - 0,5 \cdot (\log(D / m) - 0,3)$
Sovituskertoimet tiesilloille, kuormat LM1 ja LM2, $L = 2-6,0$ m	$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q$	$0,8 + 0,2 \cdot (D - 2 \text{ m}) / 4 \text{ m}$	-
Sovituskertoimet tiesilloille, kuormat LM1 ja LM2, $L \geq 6,0$ m	$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q$	1,0	-
Sovituskertoimet tiesilloille, kuorma LM3	β_{Q1}	0,8	-
Geotekineset varmuuskertoimet			
Tilavuuspainot, moduulit, kitkakulmat	g_{geo}	1,0	1,0 tai 1,25**
Teräksen varmuuskertoimet, staattinen kuorma			
Teräksen murtuminen, muokkaamaton poikkileikkaus	γ_{M0}	1,0	$1,0 \leq 1,0 + (D-3\text{m}) / 3\text{m} \leq 1,1$
Teräksen murtuminen, mataloitettu poikkileikkaus	γ_{M0red}	1,15	1,15
Teräksen varmuuskertoimet, väsyttävä kuorma			
Sillat $L = 2-6,0$ m	γ_{Mf}	$1,0 + 0,15 \cdot (D - 2 \text{ m}) / 4 \text{ m}$	1,4 jos $D \leq 5,0 \text{ m}$
Sillat $L > 6,0$ m	γ_{Mf}	1,15	1,6 jos $D > 5,0 \text{ m}$
Raideliikenteen sillat, aina	γ_{Mf}	1,35	1,6
Liitoksen varmuuskertoimet, staattinen kuorma			
Pultin ja yksityiskohtien kestävyys	γ_{M2}	1,25	$1,0 \leq 1,0 + (D-3\text{m}) / 3\text{m} \leq 1,1$
Pultin esijännitys murtorajatilassa	γ_{M7}	1,1	-
Pultin liukuminen	γ_{M3}	1,25	-
Liitoksen varmuuskertoimet, väsyttävä			
Pultin kestävyys, $L = 2-6,0$ m	γ_{Mf}	$1,0 + 0,15 \cdot (D - 2 \text{ m}) / 4 \text{ m}$	1,4 jos $D \leq 5,0 \text{ m}$
Pultin kestävyys, $L > 6,0$ m	γ_{Mf}	1,15	1,6 jos $D > 5,0 \text{ m}$
*) Erikoiskuormilla 1,4			
**) Modulin ja kitkakulman varmuuskertoimet 1,25			

Suurin ero uusien ja vanhojen kertoimien välillä on väsyttävien kuormien kertoimisissa. Väsytyksmitoitukseen on kuitenkin tullut paljon muutoksia. Näihin perehdytään tarkemmin luvussa 3. Väsytyksmitoitus.

Hyötykuormien osavarmuuskertoimen on varsinkin tieliikenteen siltojen kuormilla pienentynyt. Tämä ei kuitenkaan riitä kompensoimaan suurempia akselikuormia. Tämä ei ole teräspultkisiltojen mitoitukseen suoraan vaikuttava asia, koska kertoimet ja kuormakaaviot koskevat kaikkia siltoja.

Aiempien kokemusten perusteella ruotsalaisen käsikirjan (Pettersson 2010) mukainen empiirinen mitoitusmenetelmä on ankarampi pieniläpimittaisille teräsputkisilloille. Tämä johtuu siitä, että pieniläpimittaisissa teräsputkissa teräsrakenteen jäykkyys on suhteessa maan jäykkyyteen huomattavasti suurempi kuin suuriläpimittaisilla teräsputkilla. Vastaavasti on huomattu, että suuriläpimittaisilla teräsputkisilloilla teräsrakenteen suhteellinen jäykkyys on pienempi ja ympäröivä maa on vaikuttaa enemmän rakenteen kokonaiskantavuuteen. FEM-menetelmillä ei ole onnistuttu ottamaan huomioon tätä maan holvaavaa ja kuormien jakavaa vaikutusta yhtä tehokkaasti kuin tällä ruotsalaisella empiirisellä mitoitusmenetelmällä.

Pienten teräsputkisiltojen ankaraksi osoittautuneesta mitoituksesta ja näiden pienten siltojen vähäisistä onnettomuuden seuraamusriskeistä johtuen kuormakaavioille LM1 ja LM2 on otettu käyttöön putken jännemitasta riippuva sovituserroin. Sovituserroin lasketaan kaavoilla 2.5a ja 2.5b.

$$\alpha_q = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{D - 2m}{4m} \quad \text{kun } 2 \text{ m} \leq D \leq 6 \text{ m} \quad (2.5a)$$

$$\alpha_q = 1,0 \quad \text{kun } D > 6 \text{ m} \quad (2.5b)$$

joissa

D on teräsputken jännemitta [m]

Kaavoja 2.5a ja 2.5b ei kuitenkaan voi käyttää samanaikaisesti valtionapua saavien yksityisteiden pienennyskertoimen kanssa.

Eurokoodeihin siirtymisen jälkeen tie- ja raideliikenteen silloissa on tapahtunut muutoksia suhteellisessa varmuustasossa. Raideliikenteen siltojen kuormat eivät ole kasvaneet, mutta osavarmuuserroin on pienentynyt. Kuten aiemmin todettiin, samaa ei ole tapahtunut tieliikenteen silloille.



Kuva 2.3. Vaurioitunut teräsputkisilta (Julku 2011)

Teräksen materiaalikertoimiin ei ole tullut suuria muutoksia, mutta liitosten osavarmuuserroin on kasvanut selvästi. Pultin mitoitukseen tällä ei ole kovin suurta merkitys-

tä, koska mitoituksessa käytetään murtolujuutta aiemmin käytetyn myötölujuuden sijaan. Osavarmuuskeroainta γ_{M2} käytetään myös pultin kannan läpileikkautumis- ja pultin reunapuristuskestävyyden laskennassa.

Geoteknisten osavarmuuskertoimien pienentäminen johtuu ajattelutavan muutoksesta. Koska maan geoteknisiä ominaisuuksia ei pidetä kuormina, vaan osana rakenteen toimintaa, voidaan kertoimet jättää kokonaan pois. Asiaa pohdittiin useaan otteeseen geotekniikan asiantuntijoiden toimesta.

Kuvassa 2.3. on ruotsalaisessa laskettelukeskuksessa lommahtanut teräsputkisilta. Teräsputkessa on pieni peitesyvyys ja kevyt puinen kansirakenne, jonka pitäisi parantaa kuorman jakautumista.

2.3 Rakenneanalyysi

2.3.1 Yleistä

Aallotettujen teräsputkisiltojen rakenneteräs mitoitetaan murto- ja käyttörajatilassa normaalivoimalle ja taivutusmomentille, sekä edellisten yhdistelmälle. Teräsputkea ei mitoitetta leikkausvoimalle. Voimasuureet lasketaan ruotsalaisen käsikirjan Design of Soil Steel Composite Bridges (Pettersson & Sundqvist 2010) mukaan. Ruotsalaisen käsikirjan 4. painoksen (2010) ja suomalaisen teräsputkiohjeen (2008) julkaisun välillä on tullut muutama muutos voimasuureiden laskentaperusteisiin.

Normaalivoiman laskentatapaan ei ole tullut mitään muutoksia. Taivutusmomentin laskentaan on ruotsalaisen käsikirjan (Pettersson & Sundqvist 2010) 4. painoksessa tullut pieniä muutoksia. Putken ja maan jäykkyyksien suhdetta kuvaavalle λ_F -kertoimelle on annettu aiempaa tiukemmat raja-arvot. Kertoimen suurin sallittu arvo on pienentynyt sadastatuhannesta (100000) viiteenkymmeneentuhanteen (50000). Tämä muutos rajoittaa kaikkein jäykimpien ja pienimpien putkien käyttöä.

Taivutusmomentin laskennassa käytetään teoreettisia apusuureita f_1 , f_2 , f_3 ja f_4 (emt.) Näistä viimeinen jaetaan lisäksi neljään (4) osaan. Kertoimen f_4''' määrittäminen poikkeaa ruotsalaisen käsikirjan 4. painoksessa aiemmin julkaistuista ruotsalaisista ja suomalaisista ohjeista. Kertoimen kaavaa on muutettu yksinkertaisemmaksi.

Putkisilloissa käytetyt hyvin ohutseinäiset aallotetut profiilit ovat alttiita paikalliselle lommahtamiselle. Yleisesti käytetyille aallotetuille profiileille on ruotsalaisessa käsikirjassa, Design of soil steel composite bridges (Pettersson & Sundqvist 2010), annettu ainepaksuuden raja-arvo, jonka jälkeen poikkileikkaus voidaan hyödyntää täysin. Nämä raja-arvot on esitetty edellä mainitun teoksen kuvassa B1.1. Erikoistapauksia varten ruotsalaisessa käsikirjassa on esitetty kaava (b1.h) kriittisen lommahduksen laskemiseen.

2.3.2 Yhdistetyt rasitukset

Lasketulle normaalivoimalle ja taivutusmomentille pitää tarkistaa rakenneteräksen kestävyys käyttö- ja murtorajatilissa. Käyttörajatilassa tarkistetaan, että rakenneteräksen

myötöraja ei ylitä voimasuureiden yhdistelmästä. Murtorajatilassa tarkistetaan kestävyys yhdistettyjen rasitusten lisäksi pelkälle normaalivoimalle.

Eurokoodin standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaisesti normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus tarkistetaan kaavalla 2.6. Suunnitteluohjeen päivitystyön aikaisessa vaiheessa huomattiin uuden, eurokoodin mukaisen, yhteisvaikutuksen mitoitusohjeen olevan noin 30 % ankarampi vanhaan kaavaan verrattuna.

$$\frac{N_d}{\chi_y \cdot N_{cr}} + k_{yy} \frac{M_d}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.6)$$

missä

N_d	on teräsputkessa vaikuttava normaalivoiman mitoitusarvo [kN/m]
N_{cr}	on aallotetun teräsprofiilin plastinen normaalivoimakestävyys [kN/m]
χ_y	on normaalivoimakestävyysnähän nurjahduskerroin
k_{yy}	on normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskerroin
M_d	on teräsputkessa vaikuttava taivutusmomentin mitoitusarvo [kN·m/m]
$M_{y,Rd}$	on aallotetun teräsprofiilin plastinen taivutusmomenttikestävyys [kN·m/m]

Kaavan 2.6 mukainen yhteisvaikutusehto on kuitenkin kehitetty suoria sauvamaisia rakenteita varten. Kaava ei sovellu kaarimaisille rakenteille, jotka saavat voimakasta sivutukea ympäröivästä maasta. Mahdollisuutta käyttää edellisen ohjeen mukaista yhteisvaikutusten mitoituskaavaa (kaava 2.7) on tutkittu teräsputkisiltaohjeen päivityksen yhteydessä. Tämän tutkimuksen tuloksia on käsitelty tämän diplomityön kappaleessa 2.6.

$$\left(\frac{N_d}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \frac{M_d}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.7)$$

missä

N_d	on teräsputkessa vaikuttava normaalivoiman mitoitusarvo [kN/m]
N_{cr}	on aallotetun teräsprofiilin plastinen normaalivoimakestävyys [kN/m]
α_c	on normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskerroin
M_d	on teräsputkessa vaikuttava taivutusmomentin mitoitusarvo [kN·m/m]
$M_{y,Rd}$	on aallotetun teräsprofiilin plastinen taivutusmomenttikestävyys [kN·m/m]

Kaavoja 2.6 ja 2.7 verrattaessa, huomataan yhteisvaikutuskertoimien vaikuttavan eri tavalla kummassakin kaavassa. Vertailulaskelmissa huomattiin kaavan 2.7 yhteisvaikutuskertoimen α_c olevan lähes aina arvoltaan yli yhden (1). Tämä pienentää lopullista käyttöastetta. Kaavan 2.6 normaalivoimakestävyysnähän nurjahduskerroin (χ_y) on aina alle yhden (1) ja yhteisvaikutuskerroin (k_{yy}) aina yli yhden (1). Kokonaisuudessaan edellä mainittujen kertoimien vaikutus on lähtöarvoista riippumatta noin 30 %

2.4 Liitokset

2.4.1 Lujuudet ja varmuuskertoimet

Teräsputkisiltojen pulttiliitokset eivät ole standardin SFS-EN 1993-1-8 vaatimusten mukaisia. Tästä johtuen niiden mitoitus on jouduttu tekemään jonkin verran muutoksia, verrattuna edellä mainitun standardin ohjeisiin. Liitoksissa käytetään muttereita joiden kosketuspinta on kartion mallinen ja pultteja joiden kosketuspinta on kovera tai siinä on nystyröitä. Näiden avulla liitososat pureutuvat profiilipeltiin. Kuvassa 2.4. on erilaisia putkisilloille tarkoitettuja liitososia. Kuvassa 2.4 on esitetty myös edellä mainittuja liitososien erityispiirteitä. Lisäksi pultin reikien halkaisija ylittää standardissa 1993-1-8 annetun enimmäisarvon. Muita poikkeavuuksia standardista ovat lähes koko pultin pituudella olevat kierteet ja ilman aluslevyjä tapahtuva asennus.



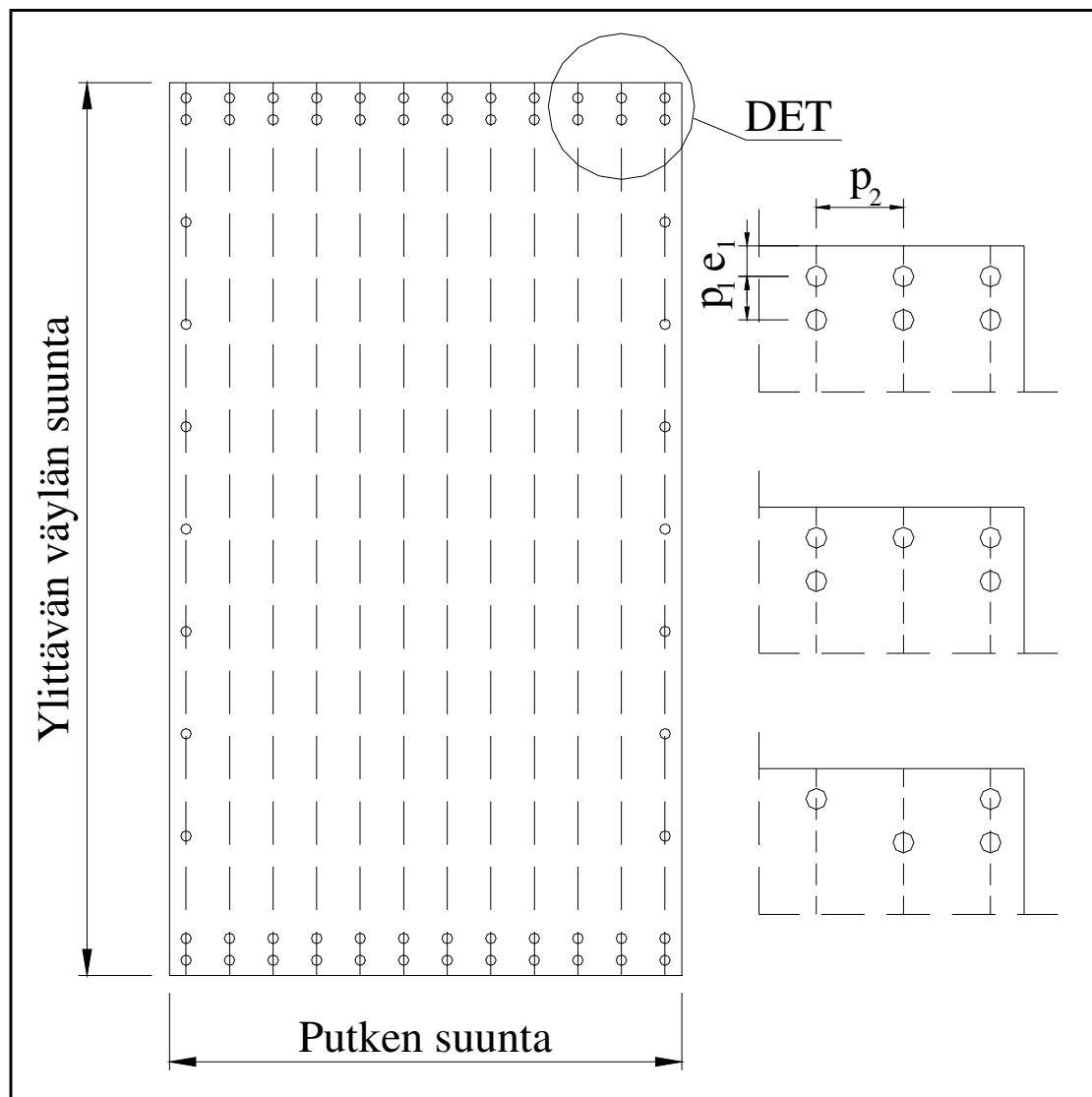
Kuva 2.4. Liitososat (Julku 2011)

Pulttien sijoittelussa pitää ottaa huomioon liitosten mitoitusstandardin SFS-EN 1993-1-8 taulukossa 3.3, sekä standardin SFS-EN 1993-1-9 taulukossa 8.1 esitetyt vaatimukset pulttien keskinäisistä ja reunaetäisyyksistä. Pultit sijoitetaan kuvan 2.5 mukaan. Profiilin sivulle asennettavat pultit voidaan asentaa vain yhteen riviin. Esimerkiksi Boxculvert-siltojen vahvikelevyissä on mahdollista asentaa pulttirivi myös keskelle levyä. Pulttien jako ylittävän väylän suunnassa on profiilikohtainen vakio, eikä siihen voi vaikuttaa. Levyjen päihin pultit voidaan asentaa 1-3 riviin. Rivien määrä on profiiliriippuvainen. Kuvassa 2.5 on esitetty kolme (3) vaihtoehtoa pulttien sijoittelulle 55x200 profiilissa. Samassa kuvassa on esitetty myös kirjaintunnukset pulttien sijoittelun mitoille.

Pultit sijoitetaan putken suunnassa profiililevyn reunalle kahteen riviin. Pulttien määrä vaihtelee profiilin tyypin ja mitoituksen mukaan. Sillan suunnassa pultit asennetaan profiililevyn reunalle yhteen riviin.

Tutkimuksen (Jeun & Rhee 2007) mukaan kaksirivisissä liitoksissa liitoksen kapasiteetti ei kasva lineaarisesti pulttien määrän mukaan. Pulttien määrän liiallinen kasvattaminen aiheuttaa liitoksen muodonmuutoskyvyn heikkenemistä, mikä johtaa levyn mur-

tumiseen liitoksessa. Edellä mainitussa tutkimuksessa esitettiin vaihtoehtoinen malli pulttien sijoitukseen. Tässä mallissa pultit ovat kolmessa rivissä ja osittain limittäin. Tämän kaltainen pulttijärjestys paransi liitoksen kestävyyttä. Ongelmaksi tulevat levyjen valmistus, sillä nykyiset valmistuskoneet eivät yleensä mahdollista kolmirivisten pulttiliitosten valmistusta.



Kuva 2.5 Pulttien sijoittelu (Julku 2011)

Putkisilloissa käytettävien pulttien lujuusluokka on joko 8.8 tai 10.9, joten niiden murtolujuus on joko 800 MPa tai 1000 MPa. Murtolujuus ei ole muuttunut vanhoista ohjeista. Eurokoodin mukaisesti pulttien kestävyys tarkistetaan murtolujuudelle (SFS-EN 1993-1-8). Tätä kuitenkin kompensoidaan nostamalla liitosten varmuuskerrointa arvoon 1,25 (SFS-EN 1993-1-8). Aikaisemman Teräspulttisillat -ohjeen mukainen liitosten varmuuskerroin vaihteli välillä [1,0...1,1], riippuen putken jännemitasta. Siirtyminen mitoituksessa pultin murtolujuuden käyttöön ja osavarmuuskertoimen nostaminen eivät aiheuta juurikaan muutoksia pultin kestävyudessa. Koska liitos ei ole standardin SFS-EN 1993-1-8 mukainen, tehdään pultin veto- ja leikkauskestävyyteen 15 % vähennys.

Pultin reikien vaikutusta rakenneteräksen teholliseen poikkileikkaukseen ei tarvitse ottaa huomioon, jos teräsputki on puristettu. Erikoistapauksissa, joissa teräsputki on kokonaan tai osittain vedetty, pitää profiilin kestävyys tarkistaa teholliselle poikkileikkaukselle jos kaavan 2.8 ehto ei täyty.

$$\frac{0,9 \cdot A_{\text{net}} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_y \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.8)$$

missä

A_y on poikkileikkauksen rei'ittämätön pinta-ala [mm^2/mm]

A_{net} on poikkileikkauksen rei'itetty pinta-ala [mm^2/mm]

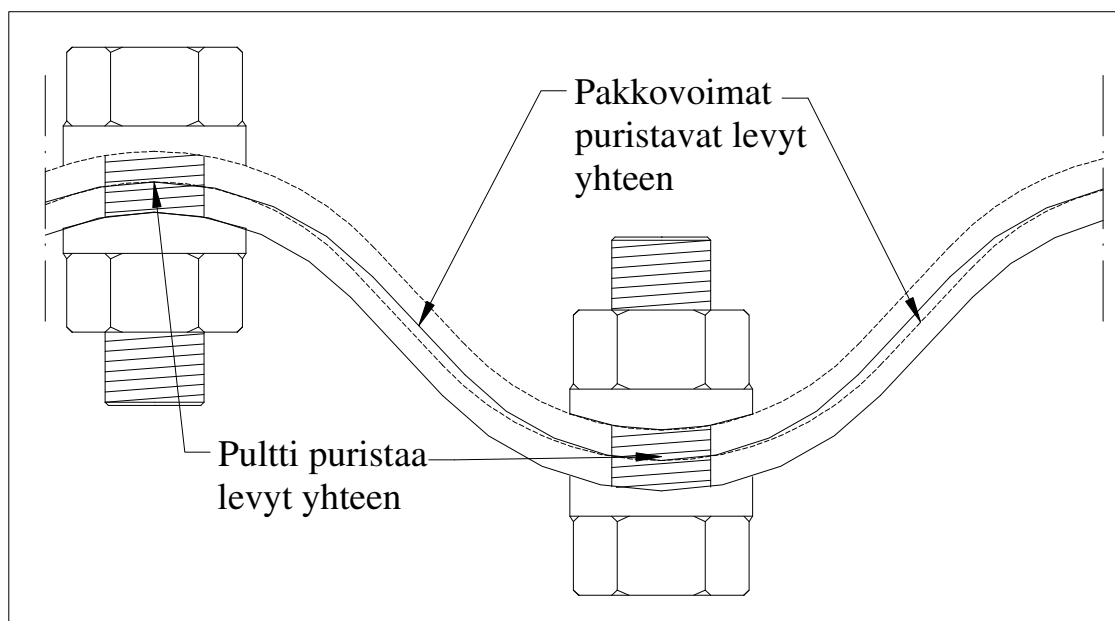
f_u on levyteräksen vetomurtolujuus [MPa]

f_y on levyteräksen myötölujuus [MPa]

γ_{M2} ja γ_{M0} ovat taulukon 2.1 mukaisia varmuuskertoimia

2.4.2 Liitoksen toiminta ja kitkan hyödyntäminen

Teräsputkisiltojen suunnitteluohjeen uusimisen yhteydessä on pohdittu paljon liitosten todellista toimintaa. Työryhmän tietoon ei ole tullut yhtään tapausta, jossa putkisiltaan olisi syntynyt vaurioita liitoksen pettämisen johdosta. Putkisillan suunnittelussa käytettävässä rakennemallissa oletetaan, että levyjen liitoskohta on vähintään yhtä jäykkä kuin ehjä levy.



Kuva 2.6. Kitkan vaikutusliitoksessa (Julku 2011)

Levyjen liitoskohdassa kahden levyn pitää painua tiiviisti toisiaan vasten. Koska kyseessä on kaksi täysin samanlaista profiilia, syntyy liitokseen joko suuri kitka tai liitos jää hieman joustavaksi. Kummassakin tapauksessa pultille kertyvät rasitukset jäävät suunniteltua pienemmiksi. Levyjen aallotusten kiilautuessa toisiaan vasten syntyy liitokseen kitkavoima, joka on todellisuudessa suurempi kuin vastaavilla suorilla levyillä. Tämän kitkan suuruuden tutkimiseksi on tehty koejärjestelysuunnitelma, joka on esitetty

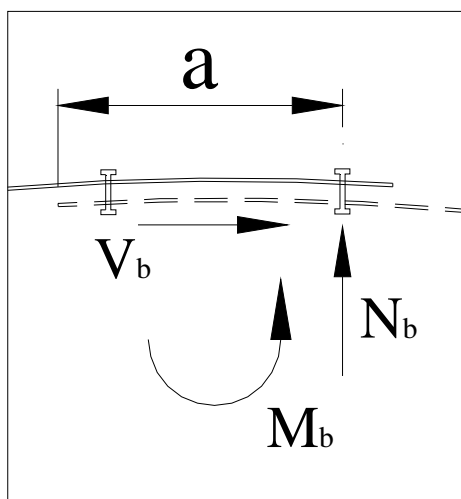
tämän diplomityön liitteessä 4. Vaikka kokeita kitkan todellisesta vaikutuksesta liitoksessa ei olekaan vielä tutkittu, harkitaan kitkan hyödyntämistä liitoksen mitoituksessa.

Kuvassa 2.6 on havainnollistettu pulttiliitoksen toimintaa aallotetussa profiilissa. Liitos on edellä mainitun kuvan kaltainen, jos pulttien kiristysvoima riittää vetämään levyt kokonaan yhteen. Tällöin voimat välittyvät myös kitkan avulla. Kitkaa muodostuu pulttien kohdalle pultin esijännitysvoimasta. Lisäksi liitoksen toimintaa parantavaa kitkaa syntyy pulttien väliselle alueelle, jossa levyn muodonmuutoksista syntyneet pakko-voimat painavat levyjä toisiaan vasten. Nämä pulttien välisellä alueella olevat pakko-voimat ovat hankalia määrittää ja ne riippuvat profiilin tyypistä ja ainevahvuudesta, sekä pulttien määrästä liitoksessa.

Todellisessa tilanteessa liitoksessa levyt eivät koskaan painaudu täysin tiiviisti toisiinsa vasten. Suurin rako jää pultin kohdalle. Tämä rako mahdollistaa liitoksen joustamisen liikennekuorman vaikutuksen alaisena. Tästä johtuen pultit eivät rasitu yhtä paljon kuin täysin jäykässä liitoksessa.

2.4.3 Vetorasitus

Monilevyrakenteisten putkisiltojen taivutusmomentti välittyy levyjen jatkoskohdassa levyltä toiselle pulttien välityksellä. Kun pulttiliitokseen vaikuttaa kuvan 2.7 mukainen taivutusmomentti M_b , pitää pultit mitoittaa voimalle N_b . Voima N_b voidaan laskea kaavalla 2.9, joka ottaa huomioon pultin suuremmasta reunaetäisyydestä, a , syntyvän vipuvaikutuksen.



Kuva 2.7. Pulttiliitoksessa vaikuttavat voimat (Julku 2011)

$$N_b = \frac{M_b}{a \cdot n_b} \quad (2.9)$$

missä

M_b on liitoksen kohdalla vaikuttava taivutusmomentti [kN·m/m]

a on vedolla olevan pulttirivin etäisyys levyn reunasta [m]

n_b on pulttien määrä vedolla olevassa pulttirivissä metrin matkalla [1/m]

Pultin varren suuntaisilla voimilla rajoittavana tekijä on joko pultin kestävyys tai pultin kannan läpileikkautuminen teräksestä. Kuten aiemmin mainittiin, on liitoksien mitoituksessa käytettävä osavarmuuskerroin nostettu arvoon 1,25. Tämä ei ole juurikaan vaikuttanut pultin mitoitukselliseen kestävyys. Myös pultin kannan läpileikkautumista laskettaessa käytetään rakenneteräksen vetomurtolujuutta. Pultin vetokestävyys voidaan laskea kaavalla 2.10 ja pultin kannan lävistymiskestävyys kaavalla 2.11.

$$\frac{N_{d,b}}{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_{eff} / \gamma_{M2}} \leq 1,0 \quad (2.10)$$

missä

$N_{d,p}$	on pultissa vaikuttava normaalivoima [kN]
f_{ub}	on pultin murtolujuus [MPa]
A_{eff}	on pultin tehollinen pinta-ala [mm ²]
γ_{M2}	on taulukon 2.1. mukainen osavarmuuskerroin

$$\frac{N_{d,b}}{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_y \cdot f_u / \gamma_{M2}} \leq 1,0 \quad (2.11)$$

missä

$N_{d,p}$	on pultissa vaikuttava normaalivoima [kN]
f_u	on rakenneteräksen vetomurtolujuus [MPa]
d_m	on pultin kannan halkaisija [mm]
t_y	on profiilin ainevahvuus [mm]
γ_{M2}	on taulukon 2.1. mukainen osavarmuuskerroin

2.4.4 Leikkausrasitus

Liitoksen pulttien pitää kestää putken normaalivoiman aiheuttamat rasitukset. Kuvassa 2.7. on tätä putken normaalivoimaa merkitty tunnuksella V_b . Pultin leikkauskestävyys lasketaan kaavalla 2.12. Aallotetun teräsprofiilin liitos toimii aina yksileikkeisenä.

$$\frac{N_d}{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_{eff} \cdot n_b / \gamma_{M2}} \leq 1,0 \quad (2.12)$$

missä

N_d	on putkessa vaikuttava normaalivoima [kN/m]
α_v	on pultin lujuudesta riippuva kerroin. Pultin lujuus = 8.8, niin $\alpha_v = 0,6$
f_{ub}	on pultin murtolujuus [MPa]
A_{eff}	on pultin tehollinen pinta-ala [mm ²]
n_b	on pulttien määrä liitoksessa metriä kohden [1/m]
γ_{M2}	on taulukon 2.1. mukainen osavarmuuskerroin

Optimaalisessa tilanteessa pulteille ei tule lainkaan leikkausrasitusta. Tämä edellyttäisi, että kaikki teräsputken normaalivoimat siirtyisivät liitoksen kohdalla kitkan avulla levyltä toiselle.

2.4.5 Yhdistetyt rasitukset

Liitoksissa pitää tarkistaa pulttien yhdistetty normaali- ja leikkausvoimakestävyys. Kestävyys tarkistetaan kaavalla 2.13. Kaavassa kestävyysarvot ovat pultin kestävyysarvoja.

$$\frac{N_{d,b}}{1,4 \cdot F_{Rt}} + \frac{N_d}{F_{Rv}} \leq 1,0 \quad (2.13)$$

missä

$N_{d,b}$ on pultissa vaikuttava normaalivoima [kN]

N_d on putkessa vaikuttava normaalivoima [kN/m]

F_{Rt} on pultin normaalivoimakestävyysarvo [kN]

F_{Rv} on pultin leikkausvoimakestävyysarvo [kN/m]

Pultin yhdistettyjen rasitusten mitoituksen eurokoodin mukainen laskentakaava on muuttunut vanhasta käytöstä poistuvaan ohjeeseen verrattuna. Aiemmin yhteisvaikutuksen kestävyys tarkastettiin kaavalla, jossa sekä normaali-, että leikkausvoiman käyttöasteet korotettiin toiseen potenssiin. Uusi yhteisvaikutuskaava on jonkin verran ankarampi teräsputkisilloille vanhaan kaavaan verrattuna.

2.4.6 Reunapuristus

Teräsputkisiltojen liitoksissa on aiemmin mitoitettu myös pultin reunapuristuskestävyys. Useassa tapauksessa pellin reunapuristuskestävyys on ollut tarkisteltavista kohdista kaikkein mitoittavin. Teräsputkisiltaohjeen uusimisen yhteydessä on pohdittu tämän asian järkevyyttä ja todenmukaisuutta. Ruotsin teräsputkisiltaohjeessa ei edellytetä lainkaan reunapuristuskestävyyden tarkastamista. Ohjeen mukaan reunapuristus ei voi missään tilanteessa olla mitoittava.

Reunapuristuskestävyyden laskentaan on tullut samanlainen muutos kuin pultinkannan läpileikkautumiskestävyys laskentaan. Liitosta laskettaessa pitää eurokoodin (SFS-EN 1993-1-8) mukaan käyttää materiaalille osavarmuuskerrointa 1,25. Teräsprofiilin aineominaisuutena käytetään kuitenkin vetomurtolujuutta.

Liitoksen reunapuristuksen kannalta on oleellista teräsputkessa vaikuttavan normaalivoiman suunta. Lähes kaikissa tapauksissa teräsputkessa on puristava normaalivoima. Tällöin ei tarvitse tarkistaa tapausta jossa pultti repeäisi ulos teräslevystä. Jos kuitenkin jokin kuormitustilanne aiheuttaa putkeen määräävän vetojännityksen, pitää reunarepeäminen tarkistaa tälle voimalle. Liitteessä 5 on esitetty otteita vertailulaskelmista, miten jännitystila vaihtelee putken laella mitoitusajoneuvojen ylittäessä putkea.

Kuten aiemmin mainittiin, eivät aallotettujen teräsputkien liitoksissa käytettävät pultit ole normaaleja standardin mukaisia pultteja, vaan niissä on perinteisestä liitososasta poikkeava kosketuspinta. Tästä johtuen on reunapuristuksen tulkinnessa hieman epäsel-

vää, miten mahdollinen leikkauspinnan syntyminen pitäisi tulkita. Vaikka pultti ei juuri koskaan pääse kosketuksiin pultin reiän reunan kanssa, on leikkauspinnan leveytenä käytetty pultin halkaisijaa.

Reunapuristuskestävyyden mitoitusehto on standardin SFS-EN 1993-1-8 Taulukon 3.4 mukainen (kaava 2.14).

$$\frac{N_d}{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_y / \gamma_{M2}} \leq 1,0 \quad (2.14)$$

missä

N_d	on putkessa vaikuttava normaalivoima [kN/m]
f_u	on putkessa käytettävän teräksen murtolujuus [MPa]
d	on pultin halkaisija [mm]
t_y	on profiilin ainevahvuus [mm]
γ_{M2}	on taulukon 2.1. mukainen osavarmuuskerroin
k_1	on reunapultille pienin arvoista $2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5$
	on muille pulteille pienin arvoista $1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5$

joissa e_2 [mm] on pultin keskiön reunaetäisyys ja p_2 [mm] rinnakkaisten pulttien keskiöetäisyys kohtisuoraan voimaa vastaan ja d_0 pultin reiänhalkaisija.

α_b	on pienin arvoista	$\alpha_d : \frac{f_{ub}}{f_u}; 1$
------------	--------------------	------------------------------------

missä

α_d	on reunapultille	$\frac{e_1}{3 \cdot d_0}$
	on muille pulteille	$\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}$

Levyn reuna-alueen ollessa täysin puristettu voidaan reunapuristuskestävyys laskea käyttämällä α_b :n arvoa 1 ja k_1 :n arvoa 2,5 reunapulteille. Muissa tapauksissa käytetään edellä mainittuja arvoja.

Tietyin edellytyksin on mahdollista vähentää reunapuristusrasitusta hyödyntämällä liitokseen syntyvää kitkaa. Kitkaa voitaisiin käyttää joko pienentämään rasituksia tai joissain tapauksissa siirtämään putken normaalivoimat kokonaisuudessaan liitoskohdassa profiililta toiselle.

2.5 Eurokoodin tuomat epävarmuustekijät

Osana diplomityötä on tehty vertailulaskelmia vanhan ja uuden ohjeen välillä. Lisäksi uudenohjeen tuloksia ja suuruusluokkia on verrattu Ruotsista saatuihin Vectura Ab:n

mallilaskelmiin, jotka pohjautuvat vastaaviin standardeihin. Myös Petterssonin väitöskirjan (2007) materiaalina olevien kenttäkokeiden tuloksia on verrattu uusiin laskenta-perusteisiin.

Vertailulaskelmista voidaan huomata suurimpien eroavaisuuksien olevan teräsprofiilin yhdistetyn veto ja momenttikestävyys sekä väsymiskestävyys laskennassa. Molemmissa tapauksissa eurokoodin mukainen mitoitus ankarampaa. Poikkeuksena on ratasillan väsymiskestävyys tarkastelu, joka on muuttunut hieman lievemmäksi.

Tieliikenteen siltojen kuormien ominaisarvot ovat kasvaneet vanhaan ohjeistukseen verrattuna. Suurin vaikutus muutokseen on teräsputkisilloilla, joissa on matala peitesyvyys. Kuormakaavion LM2 yksittäisistä raskaista akseleista syntyy p_{traffic} -arvo, jonka ominaisarvo on puolen metrin peitesyvyydellä 46 % suurempi kuin vanhan ohjeen LK1:llä laskettu arvo. Kun huomioidaan kuormakertoimen pienentyminen, rasitukset kasvavat 9,6 %. Edellä mainittu muutos koskee kuitenkin kaikkia siltoja, joissa mitoitetaan pistekuorman vaikutuksesta yksittäisiä rakenneosia.

Kuormien kasvamista suurempi ongelma on aallotetun teräsprofiilin yhdistetyn veto- ja momenttikestävyys laskenta. Eurokoodeissa olevat laskentakaavat on tarkoitettu palkkimaisten teräsprofiilien laskentaan. Koska teräsputkisilloissa aallotettu teräsprofiili toimii yhdessä sitä ympäröivän maan kanssa, saadaan teräsrakenteille tarkoitettulla eurokoodilla tapauksesta riippuen noin 20 - 30 % suurempia käyttöasteita. Tämä ero vaikuttaa huomattavasti teräsputkisiltojen kilpailukykyyn. Putkisiltaohjetta päivittänyt työryhmä yritti säilyttää vanhassa ohjeessa olevan yhteisvaikutuskaavan myös uudessa ohjeessa eurokoodin kaavan tilalla. Yhteisvaikutuskaavan toimivuudesta on tehty FEM-laskelmia, joiden tulokset ovat osana tätä diplomityötä.

2.6 Yhteisvaikutuskaavan tutkiminen

2.6.1 FEM-malli

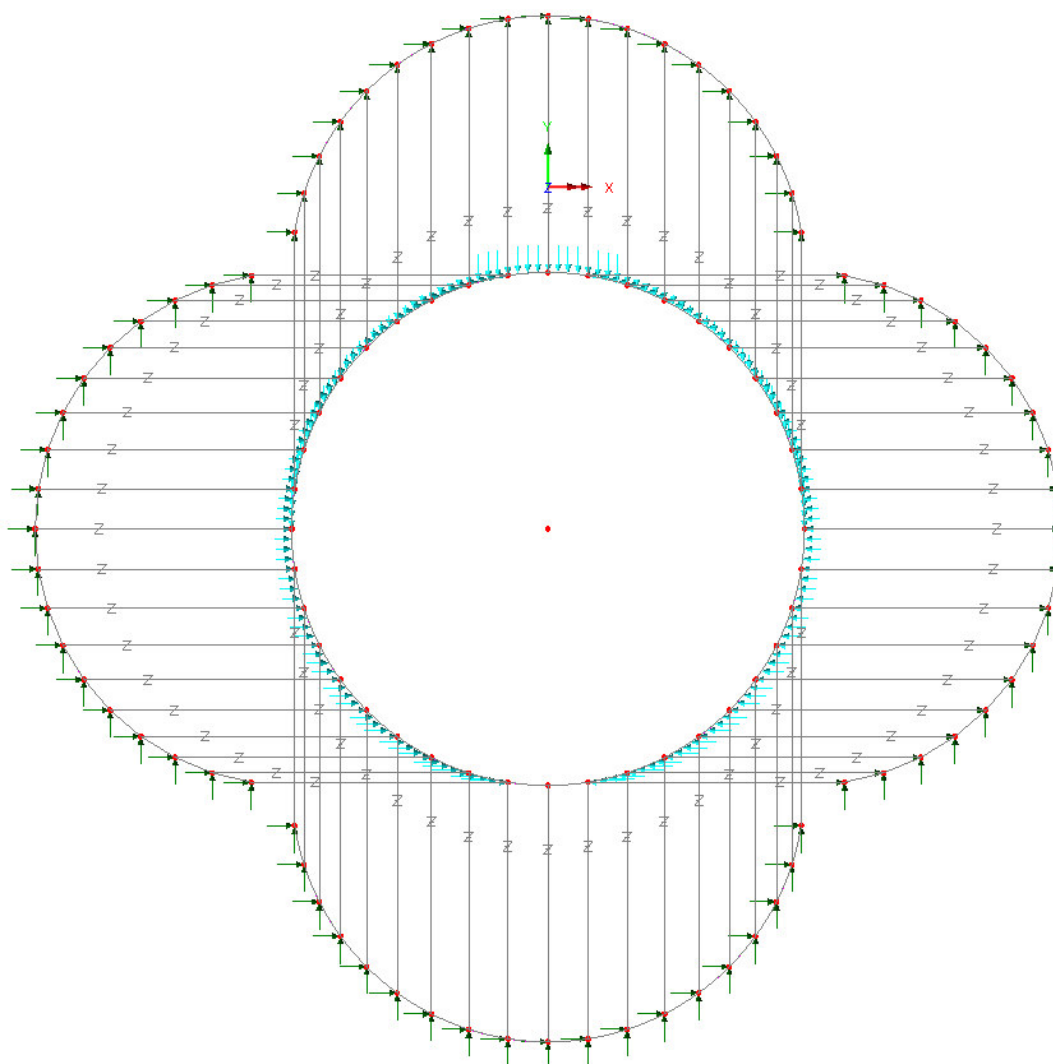
Yhteisvaikutuskaavan tutkimista varten Teräsputkisiltaohjeen päivitysryhmässä tehtiin FEM-malli teräsputkisillasta, jonka avulla laskettiin teräsputkeen syntyviä voimasuureita. Näiden voimasuureiden kestävyystarkastelu tehtiin plastisuusteorian avulla.

FEM-malliin on tehty 2-ulotteinen malli putkisillasta. Teräsputken materiaaliominaisuudet on valittu vastaamaan yhden (1) metrin putkikaistaa. Ympäristäytön ominaisuudet on mallinnettu epälineaarisilla jousielementeillä, joilla on suunnan ja sijainnin mukaan muuttuvat ominaisuudet. Josten toinen pää on kiinteässä tukipisteessä.

Vaakasuorien jousien jousivakio on Tiehallinnon Teräsputkipaalut -ohjeen mukainen (1999). Jousivakio muuttuu ympäristäytön kitkakulman ja jousen syvyysaseman mukaan. Jousen puristuspuolen myötövoima vastaa täyden passiivipaineen arvoa, kun vaakasiirtymä on 0,2 %.

Putken yläpuolella olevien pystysuorien jousien jousivakio on valittu vastaamaan 0,5 % siirtymää maanpainoa vastaan. Näiden jousien murtokuorma on maan painon

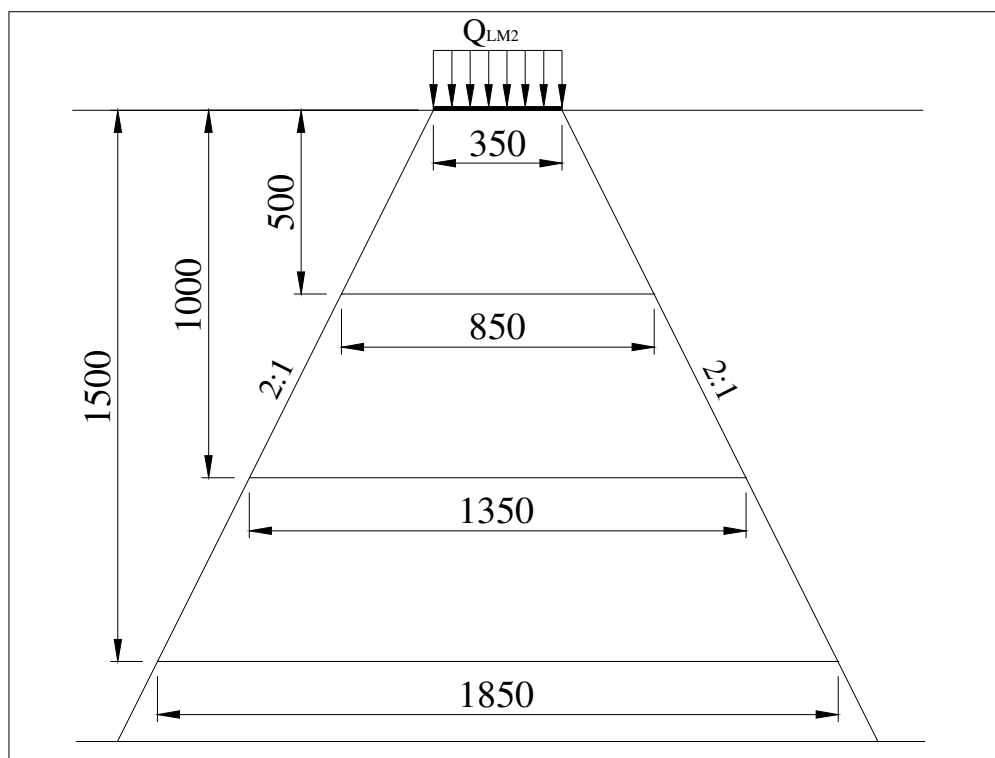
suuruinen. Putken alapuolisten pystysuorien jousien jousivakio on sama kuin vaakajousilla ja murtokuorma on lähes ääretön.



Kuva 2.8. Teräsputkisillan FEM-mallin periaatekuva (Jussila 2011)

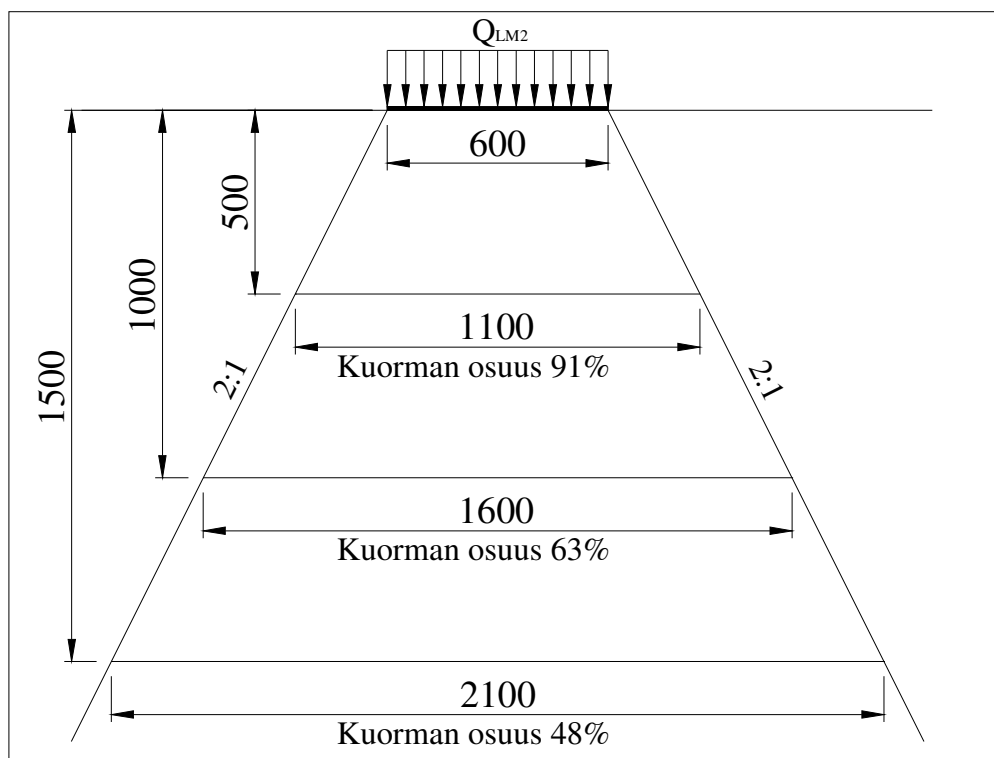
Tällä FEM-menetelmällä tarkastelun kohteena on yhden (1) metrin levyinen kaista putkisillasta. Tällöin aliarvioidaan, varsinkin suurilla putkidimensioilla, kuorman putken suuntaista jakaantumista. Vertailulaskelmat tästä asiasta on tehty kohdassa 2.6.4. Tämä jakava vaikutus syntyy teräslevyn ja maan liitтоваikutuksen mukana tuomasta jäykkyydestä. Kuten jo aiemmin todettiin, on tämä jakava vaikutus vähäinen pienillä putkidimensioilla, mutta sen merkitys kasvaa putkikoon kasvaessa. Kuormien tämän tyyppisellä jakavalla vaikutuksella on suurin merkitys putken reuna-alueille syntyvään negatiiviseen taivutusmomenttiin.

Täytön aiheuttama vertikaali maanpaine muuttuu peitesyvyyden funktiona. Vaakasuuraksi maanpaineeaksi on mallinnettu passiivipaineen mukainen kuormitus. Passiivipaine on laskettu täyttöaineen kitkakulman mukaan. Kaikki maan ominaisuudet vastaavat teräsputkisiltojen ympärystäytömmateriaalina käytettävän murskeen ominaisuuksia.



Kuva 2.9. Pyöräkuorman jakautuminen maassa sillan suunnassa (Julku 2011)

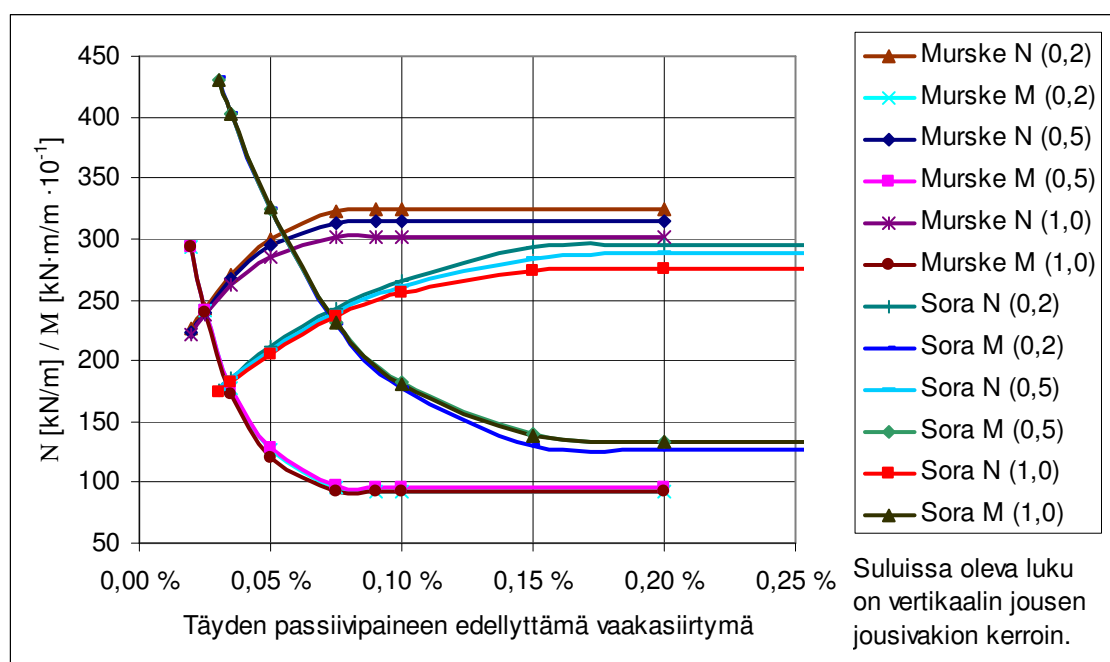
Rakennetta rasittavana liikennekuormana on kuormakaavion LM2 mukainen yksittäinen pyöräkuorma. Kuorman ominaisarvo on 200 kN ja kuormitusala $0,35 \cdot 0,60 \text{ m}^2$. Kuorma oletetaan jakautuvan maassa tasaisesti kaltevuudella 2:1. Akselikuorman jakautumispituus putken laella on kuvan 2.9 mukainen. Tälle alueelle kuorma on jaettu tasaisesti kuormaksi. Koska elementtien määrä on haluttu pitää mahdollisimman alhaisena, on kuorma jaettu mahdollisimman lähelle kuvan 2.9. mittoja olevalle pituudelle. Koska FEM-mallissa on teräsputkea vain yhden (1) metrin kaista, on pyöräkuorman vaikuttava osuus laskettu kuvan 2.10. mukaan. Kuvassa 2.10. on myös esitetty prosenttiosuus, joka kuormasta huomioidaan peitesyvyyksillä 500 mm, 1000 mm ja 1500 mm.



Kuva 2.10. Pyöräkuorman jakautuminen maassa putken suunnassa (Julku 2011)

2.6.2 FEM-mallin herkkyystarkastelu

FEM-mallin toimivuudesta on tehty herkkyystarkastelu maaparametrien arvoilla. Kuvan 2.11. käyrät esittävät yhden rakennemallin normaalivoimaa ja momenttia, kun maaparametreja on varioitu. Vaaka-akselilla on siirtymäarvo jolla täysi passiivipaine saavutetaan. Jokainen yksittäinen kuvaaja on piirretty yhdellä pystyjousen jousivakion arvolla.

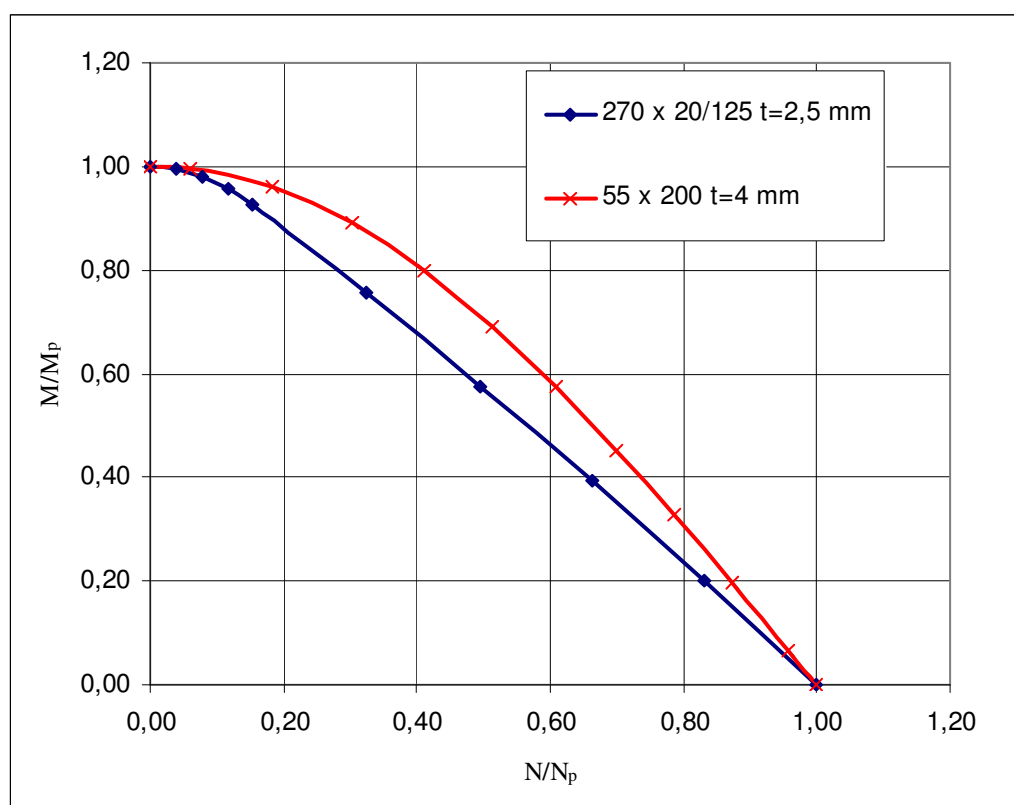


Kuva 2.11. FEM-mallin herkkyystarkastelu (Julku 2011)

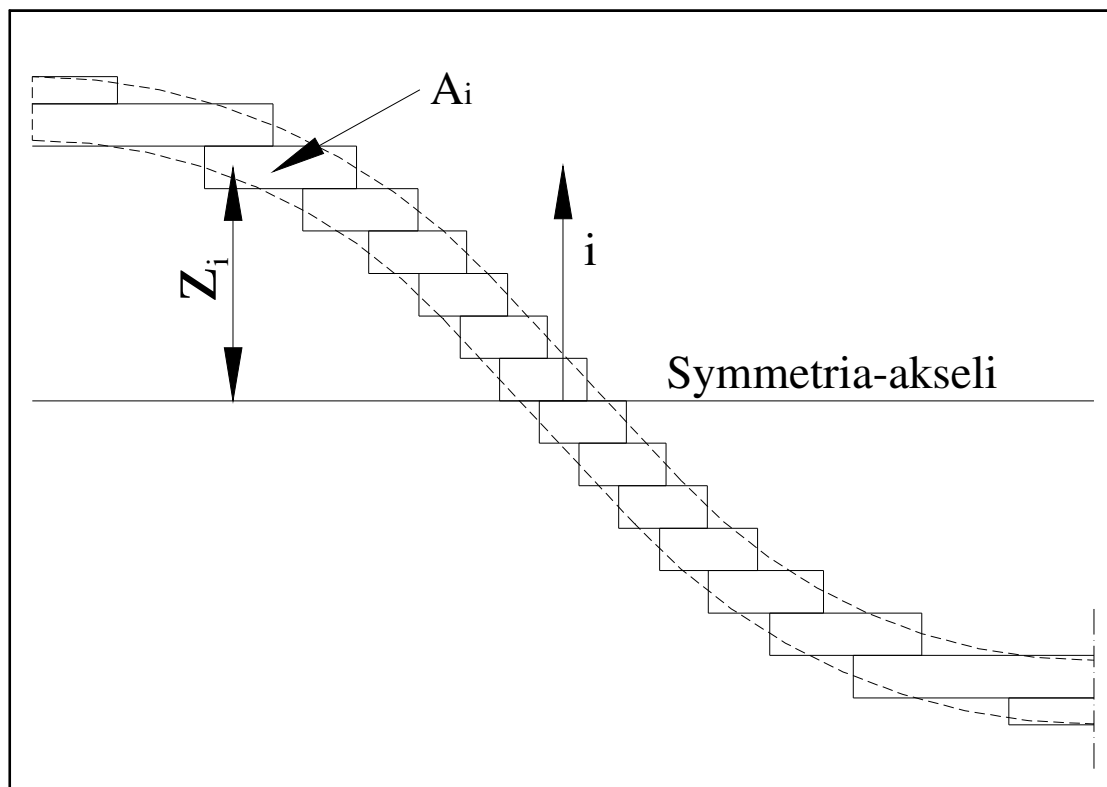
Kuvasta 2.11. voidaan tehdä johtopäätös, että vertikaalien jousten jousivakiolla on vaikutusta vain normaalivoiman mitoitusarvoon. Vaakasuuntaisen siirtymän raja-arvolla on suurempi merkitys sekä normaalivoimaan, että taivutusmomenttiin. Vertailulaskelmissa on vaakasuuntaiselle siirtymälle käytetty 0,2 % suuruista raja-arvoa, jonka alueella mallin käyttäytyminen on sekä murskeella, että soralla lineaarista.

2.6.3 Täysplastisen momentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus

FEM-mallin tulosten tulkitsemista varten määritettiin taivutusmomentin ja normaalivoiman välinen vuorovaikutuskäyrä. Vuorovaikutuskäyrät on laskettu aallotetuille teräsprofiileille joiden mitat ovat: 270 x 20/125 ja 55 x 200. Täysplastisen rajakuorman kuvaaja on esitetty kuvassa 2.12.



Kuva 2.12. Täysplastinen rajakuorma (Julku 2011)



Kuva 2.13. Profiilin jakaminen symmetria-akselin suhteen täysplastisen rajakuorman laskemista varten (Julku 2011)

Täysplastisen taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuksen määrittämiseksi on teräsprofiilin poikkileikkaus jaettu osiin, joiden pinta-ala (A_i) on välillä [5...90 mm²]. Jokaisen osapinta-alan sisäinen momenttivarsi [z_i] on etäisyys osan pintakeskiöstä profiilin poikkileikkauksen pintakeskiöön. Pintakeskiö on kaikissa tapauksissa profiilin symmetria-akselilla. Profiilin jakaminen osapinta-aloihin on esitetty kuvassa 2.13.

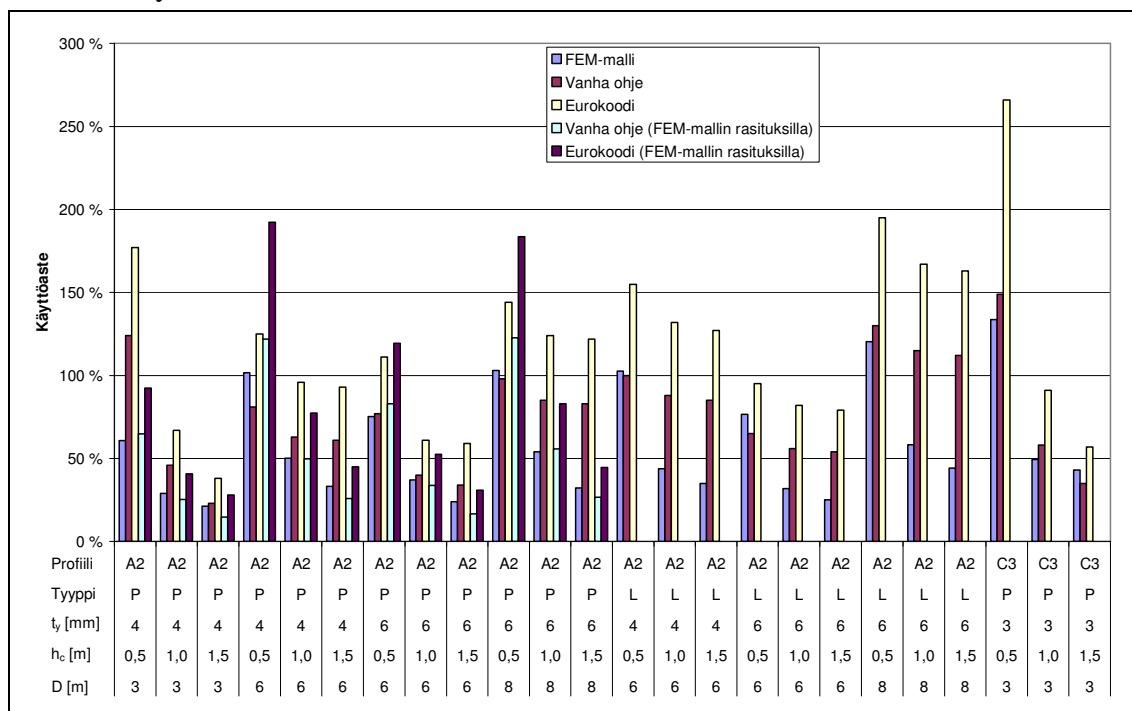
2.6.4 Vertailulaskelmat ja johtopäätökset

Vertailulaskelmissa käytettiin kuormakaavion LM2 yhtä pyöräkuormaa. Samoilla lähtötiedoilla on laskettu käyttöasteet FEM-mallin, eurokoodin ja vanhan ohjeen mukaisilla yhteisvaikutuskaavoilla. Laskelmat on tehty murtorajatilassa käyttäen eurokoodien mukaisia osavarmuuskertoimia.

Vertailulaskelmia tehtiin yhteensä 24 erilaisesta rakennemallista. Laskelmissa käytettiin kahta erilaista aallotettua teräsprofiilia, 55x200 ja 270x20/125, joista ensimmäisestä käytettiin sekä 3 mm, että 6 mm ainevahvuutta. Tutkitut putket olivat pyöreitä (P), sekä laakeita (L) ja niiden jännemitat olivat 3, 6 ja 8 metriä. Kaikki tapaukset tutkittiin peitesyvyyksillä: 500 mm, 1000 mm ja 1500 mm.

Laskelmista saadut käyttöasteet on esitetty kuvassa 2.14. Pääsääntöisesti FEM-mallilla saatu käyttöaste on kaikkein pienin tai joissain tapauksissa lähes samansuuruinen kuin vanhan ohjeen mukainen käyttöaste. Selvä poikkeus on jännemitaltaan kuuden metrin pyöreä putki, jossa on 4 millimetrin ainevahvuus. Edellä mainitun teräsputken

käyttöaste on FEM-mallilla 30 % suurempi kuin vanhan ohjeen mukaisella yhteisvaikutuskaavalla. FEM-mallin mukainen käyttöaste on kuitenkin pienempi kuin eurokoodin mukaisella yhteisvaikutuskaavalla laskettuna.



Kuva 2.14. Käyttöastevertailu (Julku 2011)

Näiden tulosten perusteella voidaan esittää, että aallotettujen teräsputkisiltojen perusaineen yhdistetty normaalivoima- ja momenttikestävyys voidaan laskea vanhaan suunnitteluohjeen mukaisella kaavalla (kaava 2.7).

Kuvaa 2.14. tutkittaessa huomataan 0,5 metrin peitesyvyydellä putken jännemitan kasvaessa kolmesta (3) metristä kuuteen (6) metriin ja muiden muuttujien pysyessä vakiona, pienenee SCI-menetelmään perustuvien laskentatapojen käyttöaste. Vastaavalla muutoksilla FEM-mallin ja plastisuusteorian avulla laskettu käyttöaste kasvaa. Voimasuureita tutkittaessa voidaan todeta pienillä putkilla ($D=3\text{m}$) FEM-mallin antavan pienempiä momenteja, kuin SCI-menetelmä. Suuremmilla peitesyvyyksillä samaa ilmiötä ei tapahdu, vaan peitesyvyyden kasvaessa käyttöaste pienenee. Lisäksi teräsputken jännemitan kasvaessa käyttöaste kasvaa.

FEM-mallin tarkemmassa tarkastelussa on huomattu, että käyttämässämme mallissa on edelleen epävarmuustekijöitä. Suurimmat ongelmat ovat kuorman jakautumisessa maan rakennekerroksissa. FEM-mallia pitäisi muokata ja siihen pitäisi lisätä ominaisuus, joka huomioisi SCI-menetelmässäkin käytetyn maan holvautumisvaikutuksen.

Erot putkeen kertyvistä momenteista johtunevat SCI-menetelmän tavasta huomioida putken koon ja jäykkyyden suhdetta ympäristäytön maamoduuliin. Jos teräsputkisillan mitoitus tehdään FEM-mallin avulla, pitää mallin toimivuuden varmistamiseksi tehdä vertailulaskelmia. Näiden vertailulaskelmien tuloksia olisi hyvä verrata todellisiin mitaustuloksiin. Hyviä vertailutuloksia on esitetty Petterssonin väitöskirjassa (2007).

3 VÄSYTYSMITOITUS

3.1 Väsymisilmiö

Puhtaasti rakenteen jännitystilasta riippuvainen staattinen murtumisilmiö on huomattavasti yksinkertaisempi ilmiö kuin dynaamisen kuormituksen aikaansaama väsytysmurto. Muuttuvan kuorman rasittaman teräsrakenteen toimintaa ja kestävyyttä on tutkittu 1800-luvulta alkaen. Tutkimukset ovat perustuneet pääosin koekuormitusten tulkintaan.

Väsymisilmiön tutkimustyön alkuvaiheessa kävi selväksi, että väsymismurtoon vaikuttaa kuormituskertojen lukumäärä, ei niihin kulunut aika. Lisäksi kaikille rautametalleille on löydettävissä jännitystaso, jonka alapuolella ne kestävät äärettömän määrän kuormitusyklejä. Nämä havainnot teki August Wöhler jo 1850-luvulla ja ne ovat edelleen tärkeimmät väsymisanalyysin lainalaisuudet. (Outinen et al. 2000)

Rakenteen väsymismurto tapahtuu vähitellen ja vaihteittain. Ilmiön alkuvaiheessa paikalliset jännityshuiput aiheuttavat mikroskooppista halkeilua johonkin rakenteen yksityiskohtaan. Vastaavien jännitysten toistuessa kasvavat halkeamat muodostavat makroskooppisia halkeamia. Näitä makroskooppisia halkeamia kutsutaan alkusäröiksi ja niiden kokoluokka on 0,1 mm. Näiden makroskooppisten säröjen laajetessa läpi koko rakenneosan syntyy väsytysmurto. Nämä kaksi ovat väsytysmurron päävaiheet. Niitä kutsutaan alkusärön syntymiseksi ja särön kasvamiseksi. Väsymismurtuman luonteeseen kuuluu vaurion eteneminen vähitellen ja lopulta äkillinen murtuminen. (Outinen et al. 2000)

Alkusäröt syntyvät yleensä rakenteen yksityiskohdan epäjatkuvuuskohtaan. Mahdollisia yksityiskohtia ovat esimerkiksi pultin kierteet, pultin reiät, hitsaussaumamat, poikkeileikkauksen muutoskohdat sekä pinnoitteen epätasaisuudet. (Outinen et al. 2000)

Väsymisilmiön tulkitsemiseksi on kehitetty useita menetelmiä. Näistä tunnetuimpia ovat Wöhler-käyrään ja Goodmanin-vaurioehtoon perustuvat menetelmät. Molempien taustalla on lukematon määrä koekuormituksia, joiden avulla on luotu yhteys jännitystason ja rakenteen kestoajan välille. (Outinen et al. 2000)

Tässä diplomityössä tehdyt väsytysmitoituksen tulkinnat ja esitykset perustuvat neljään (4) oletukseen:

1. Lars Petterssonin ruotsalaisessa mitoitusohjeessa (2010) esittämät voimasuureiden laskentaperiaatteet ovat oikeat
2. Eurokoodin (SFS-EN 1993-1-9) antamat väsytysmitoituksen perusteet ovat oikeat
3. Väsymisilmiö tapahtuu tehtyjen tutkimusten mukaisilla periaatteilla
4. Akselimassatutkimuksen mukaiseksi muokattu ajoneuvojakauma on oikea

Kaikki väsytyksmitoituksen perusteet pyritään tekemään niin, että ajoneuvojakauman ja akselimassojen mahdollisesti muuttuessa, taulukot ja periaatteet on helposti päivitettävissä ajan tasalle.

3.2 Väsymiskestävyyden arviointi

Todellisissa rakenteissa jännityssykliden intensiteetti on muuttuva. Nämä intensiteetin muutokset pitää ottaa huomioon väsymiskestävyyden, eli rakenteen eliniän arvioinnissa. Minerin kumulatiivisella vaurioteorialla voidaan arvioida vaihtelevaa amplitudista jännitysvaihtelua. Erityisen hyvin teoria sopii tapauksille, joissa jännitysvaihtelu koostuu satunnaisesti vaihtelevista toisiaan seuraavista jännityssykleistä. Jokainen jännitysvaihteluväli kuluttaa kappaleen väsymisestä suhteellisen osuuden. Minerin kumulatiivisen vaurioteorian mukainen mitoitusehto lasketaan kaavalla 3.1. (Outinen et al. 2000.)

$$\sum_i \frac{n_i}{N_{Ri}} \leq 1,0 \quad (3.1)$$

missä

n_i on tietyllä jännitustasolla tapahtuvien kuormituskertojen määrä

N_{Ri} on jännitustasoa n_i vastaava kestoletu

Minerin kumulatiivisella vaurioteorialla voidaan antaa kohtuullisen tarkka arvio rakennosan eliniästä useissa käytännön tapauksissa. Se ei kuitenkaan sovellu tapauksille, joissa kuorman intensiteetti on lineaarisesti muuttuva (Outinen et al. 2000).

Tapaukset, jotka ovat liian monimutkaisia selvitettäväksi Minerin kumulatiivisella vaurioteorialla, voidaan yksinkertaistaa esimerkiksi Rainflow-menetelmällä tai sen sovelluksilla. Rainflow-menetelmän avulla epäsäännöllinen rakenneyksityiskohdan venymätila voidaan hajottaa yksittäisiksi jännityksiksi. Näiden yksittäisten jännitysvaihteluiden väsymisikä voidaan laskea Minerin kumulatiivisella vaurioehdolla.

Rainflow-menetelmä ja sen sovellukset, kuten vesisäiliöanalogia, ovat graafisia menetelmiä jotka perustuvat jännitys- tai venymäkuvaajista tehtyihin laskelmiin. Näitä menetelmiä voidaan käyttää tulkittaessa esimerkiksi mittausdatasta saatuja tuloksia.

3.3 Oikean kuormakaavion valinta

3.3.1 Tieliikenteen väsytyskuorma

Teräspuutkissillan väsytyksmitoitusta varten on valittava tapaukseen sopiva väsytyskuormakaavio. Väsytyskuormakaaviot on esitetty Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet -ohjeessa (2010) alkaen sivulta 15. Samalla sivulla on kaava, jolla voidaan huomioida liikuntasauaman epäjatkuvuuden aiheuttama dynaaminen kuorma sillalle. Teräspuutkissilloissa ei käytetä liikuntasauvoja, vaan niiden pintarakenne on saumaton ja jatkuva.

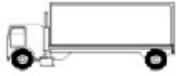




Suurilla peitesyvyyksillä on mahdollista saavuttaa teräspuutken ääretön väsytyksikä. Tämä voidaan todentaa tekemällä väsytyksmitoitus kuormakaavion FLM1 mukaan. Vä-

sytytkuormakaavio FLM1 perustuu kuormakaavion LM1, jonka akseleiden ominaiskuormat on tehty 30 % vähennys ja tasaiseen ominaiskuormaan 70 % vähennys (Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet 2010). Jos kuormakaavion aiheuttamien maksimi- ja minimijännitysten välinen vaihteluväli ei ylitä standardissa SFS-EN 1993-1-9 esitettyä vakioamplitudista väsymisrajaa (s.15), voidaan väsymisikää pitää äärettömänä.

Väsytytkuormakaavio FLM1 on useimmissa tapauksissa liian ankara aallotetuille teräsputkisilloille. Jos ääretöntä väsymisikää ei voida todistaa FLM1-kaaviolla, pitäisi väsytyksimitoitusta tehdä FLM3-kaavion mukaan (emt. s.16). Väsytytkuormakaaviossa FLM3 on yksi raskas ajoneuvo, missä on kaksi kahden akselin teliä. Mitoitusajoneuvon mitat ja massat perustuvat ranskalaisten tekemään akselimassatutkimukseen, joiden perusteella on määritetty esiintyviä raskaita ajoneuvoja parhaiten kuvaava yksittäinen ajoneuvo (Chatzis et al. 2010). Tämän mitoitusajoneuvon aiheuttamaa jännitysvaihteluväliä pitää redusoida standardin SFS-EN 1993-2 mukaisilla kertoimilla, jotka huomioivat sillan jännemitan, liikennetyypin ja suunnitellun käyttöiän. Jännemitan huomioiva kerroin on annettu vain jännemitoille jotka ovat yli 10 metriä. Valtaosa teräsputkisilloista on jännemitaltaan alle kymmenen (10) metriä, eikä väsytytkuormakaaviota FLM3 voida soveltaa näille. Tämä kuormakaavio sopii tietyin varauksin suurempien teräsputkisiltojen ja esimerkiksi Boxculvert-siltojen väsytyksimitoitukseen.

Liikenneviraston edustajan antaman ohjeistuksen mukaan teräsputkisiltojen väsytyksimitoituksessa tulee käyttää väsytytkuormakaaviota FLM4. Tätä kuormakaaviota on tarkoitettu käytettäväksi vain asianomaisen viranomaisen suostumuksella (Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet 2010). FLM4-kuormakaavio on yksityiskohtaisin väsytytkuormakaavio. Siihen kuuluu taulukon 3.1. mukaiset raskaat ajoneuvot, joiden renkaiden kosketusalat vaihtelevat taulukon 3.2. mukaan. Lisäksi raskaiden ajoneuvojen esiintymisen jakauma muuttuu liikenteen tyypin mukaan.

Taulukko 3.1. Suomalaisen akselimassatutkimuksen mukaan päivitetty ekvivalenttien kuorma-autojen sarja. Suluissa on esitetty alkuperäiset eurokoodin mukainen raskaiden ajoneuvojen esiintymisjakauma (alkuperäinen taulukko SFS-EN 1991-2 s.43).

AJONEUVOTYYPPI			LIIKENTEEN TYYPPI			
			Kauko- liikenne	Keskipitkä liikenne	Paikallis- liikenne	
KUORMA-AUTO	Akselivälit [m]	Ekvivalentit akseli- kuormat [kN]	Kuorma-autojen osuus			Pyörä- tyyppi
	4,50	70 130	15,0 (20,0)	20,0 (40,0)	35,0 (80,0)	A B
	4,20 1,30	70 120 120	15,0 (5,0)	20,0 (10,0)	35,0 (5,0)	A B B
	3,20 5,00 1,30 1,30	70 150 90 90 90	10,0 (50,0)	10,0 (30,0)	5,0 (5,0)	A B C C C
	3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	10,0 (15,0)	10,0 (15,0)	5,0 (5,0)	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	50,0 (10,0)	40,0 (5,0)	20,0 (5,0)	A B C C C

Taulukossa 3.1. esitetty ekvivalenttien kuorma-autojen sarja on muodostettu ranskalaisen tekemien tutkimusten perusteella (Chatzis et al. 2010). Alkuperäinen taulukko on julkaistu standardissa SFS-EN 1991-2. Tätä alkuperäistä taulukkoa on päivitetty paremmin Suomalaisista liikennettä kuvaavaksi muuttamalla raskaiden ajoneuvojen jakaumaa. Ajoneuvokohtaisia akselipainoja tai akseleiden keskinäisiä etäisyyksiä ei ole muokattu. Jos Liikennevirasto julkaisee uuden akselimassatutkimuksen, on taulukkoa 3.1. mahdollista päivittää laajemminkin.

Taulukko 3.2. Taulukon 3.1. pyörätyypit (SFS-EN 1991-2 Taulukko 4.8 s.44)

PYÖRÄ-/AKSELI- TYPPI	MITTOJEN MÄÄRITTELY
A	
B	
C	

Väsytyksmitoitusta varten pitää laskea ekvivalenttien kuorma-autojen aiheuttamat jännitysvaihteluvälit. Näiden jännitysvaihteluvälien avulla voidaan tarkistaa teräsputken rakenteen kestävyys väsyttävälle kuormille käyttämällä esimerkiksi Minerin kumulatiivista vaurioteoriaa. Liikenteen tyyppinä käytetään keskipitkää liikennettä, jos valvova viranomainen ei hankekohtaisesti määrää jotain muuta liikenteen tyyppiä käytettäväksi (Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet 2010).

3.3.2 Raideliikenteen väsyttävä kuorma

Raideliikenteen väsyttävät kuormat on esitetty Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet -ohjeessa (2010). Liikenneviraston edustajan kanssa on sovittu teräsputkisiltaohjetta uusittaessa, että väsytyksmitoitukseen käytetään luokittelematonta kuormakaaviota. Luokittelemattoman kuormakaavion akselikuorma on 250 kN. Kuormituksessa otetaan huomioon dynaaminen suurennuskerroin samoilla periaatteilla kuin staattisessa mitoituksessa (kaavat 2.2, 2.3 ja 2.4).

Mitoitus tehdään aina 100 vuoden käyttöiällä, mikäli tilaajan kanssa ei sovita lyhyemmästä käyttöiästä. Poikkeustapauksissa suunniteltu käyttöikä voi olla 50 vuotta, mutta tällöin teräsputki pitää pystyä korjaamaan sujutusmenetelmällä. Käyttöikämitoituksessa on huomioitava, että rataa ei synny haitallisia painumia. Liikennemäärän vaikutus huomioidaan Standardin SFS-EN 1993-2 taulukon 9.5 mukaan. Väsyttäviin kuormiin ei huomioida edellä mainitun standardin mukaista usean raiteen avustavaa vaikutusta taulukon 9.7 mukaan.

3.4 Jännitysvaihteluvälin syntyminen

3.4.1 Putkisillan päällä oleva ajoneuvo

Teräsputkisillan väsytyksimitoitusta tehdään ainoastaan liikennekuorman aiheuttamalle jännitysvaihteluvälille. Aallotettuun teräsprofiiliin syntyy vaihtelevia veto- ja puristusjännityksiä ajoneuvon ylittäessä siltaa. Teräsputkeen syntyy suurin positiivinen taivutusmomentti, kun ajoneuvon akseli on suoraan putkisillan laen yläpuolella. Akseli aiheuttaa teräsputkeen myös puristusjännitystä, joka on suoraan riippuvainen normaalivoimasta. Teräsputken maksimijännitys lasketaan kaavalla 3.2.

$$\sigma_{\max} = -\frac{N}{A_y} + \frac{M}{W_y} \quad (3.2)$$

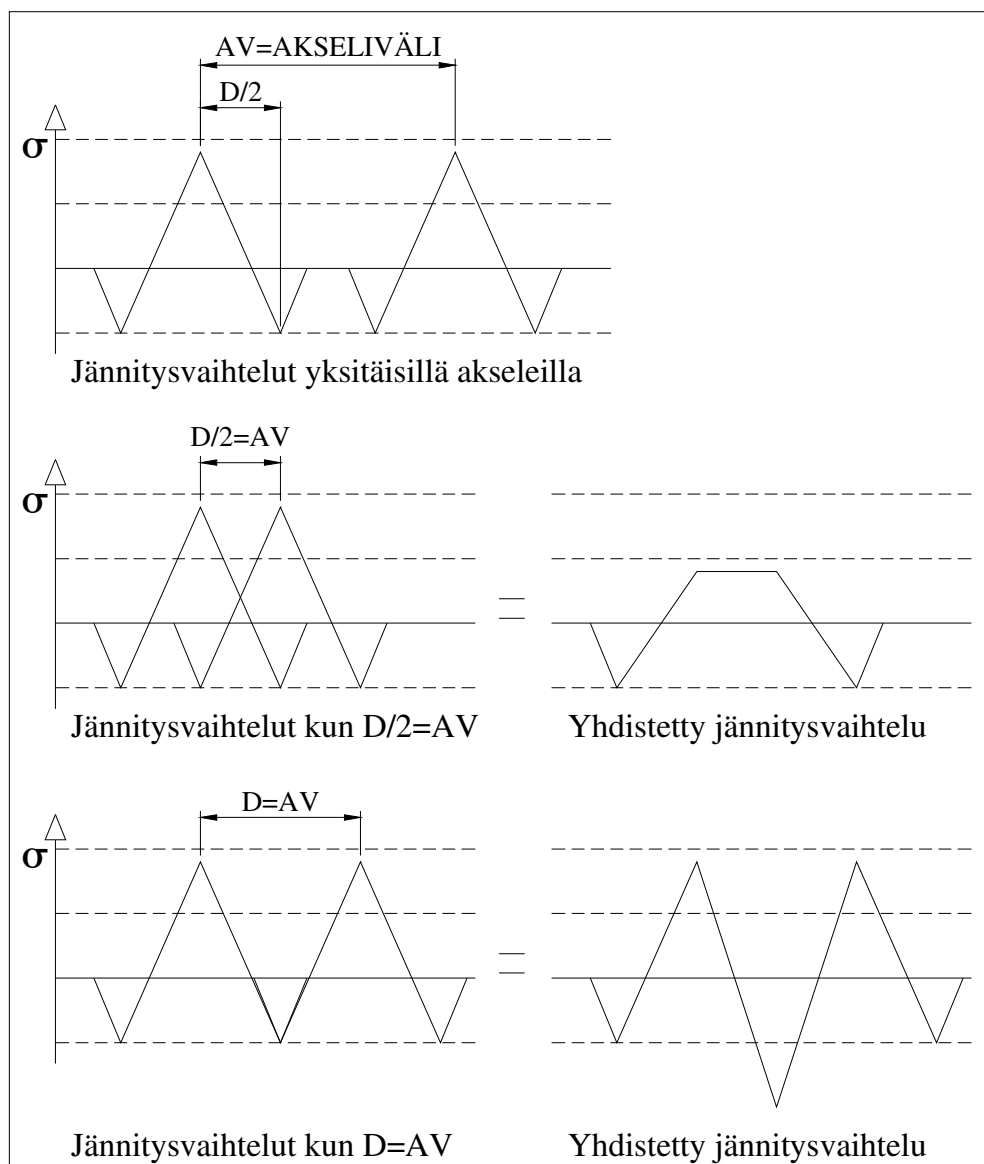
missä

N	on liikennekuorman aiheuttama normaalivoima [kN/m]
M	on liikennekuorman aiheuttama taivutusmomentti [kN·m/m]
A _y	on aallotetun teräsprofiilin poikkileikkauksen pinta-ala [mm ² /m]
W _y	on aallotetun teräsprofiilin poikkileikkauksen taivutusvastus [mm ³ /m]

Mitoitusajoneuvon akseli aiheuttaa myös negatiivisen taivutusmomentin putken laelle. Tämä negatiivinen momentti syntyy akselin siirtyessä kohti putken keskikohtaa ja uudestaan kun akseli siirtyy pois putken päältä. Aikaisemmassa Teräsputkisillatohjeessa (2008) ja Petterssonin väitöskirjassa (2007) todetaan negatiivisen momentin olevan arvoltaan puolet positiivisesta momentista akselin ollessa suoraan putken sivulla. Petterssonin väitöskirjan (2007) mukaan putken jännemitalla ja profiililla ei ole vaikutusta positiivisen ja negatiivisen momentin suhteeseen. Asian tueksi Pettersson esittää Flenerin (2005) tekemiä mittauksia Skivarpsånin rautatiesillalla.

Väsytyksimitoitusta perustuu FLM4-kuormakaavion mukaisiin todellisiin kaltaisiin raskaisiin ajoneuvoihin. Periaatteessa näiden teräsputkisillat aiheuttamat kuormitustilanteet riippuvat kuorman suuruuden lisäksi putkisillan jännemitan suhteesta raskaan ajoneuvon akseliväliin. Jos oletetaan suurimman negatiivisen taivutusmomentin syntyvän akselin ollessa suoraan teräsputken sivulla, voidaan usean akselin yhteisvaikutus teräsputken jännityksiin laskea kuvan 3.1. mukaisesti.

Tarkasteltaessa Petterssonin (2007) väitöskirjan aineistona olevia kenttäkokeita voidaan huomata, että todellisuudessa suurin negatiivinen jännitys ei synnykään akselin ollessa suoraan putken sivulla. Todellisessa kuormitustilanteessa suurin negatiivinen momentti syntyy akselin ollessa suunnilleen putken neljännespisteen kohdalla. Kuva 3.2. on Petterssonin väitöskirjasta (2007). Siinä on esitetty kaksiakselisen pyöräkuormaajan aiheuttama taivutusmomentti putken laella kuormaajan ylittäessä putkea. Pyöräkuormaajan akseliväli on 3,4 m ja putken jännemitta on 6,04 m. Suurin negatiivinen taivutusmomentti syntyy tilanteesta, jossa pyöräkuormaajan ensimmäinen akseli on yhden metrin päässä teräsputken laesta, eli kohdassa 4,0 m.



Kuva 3.1. Teoreettinen jännitysvaihteluiden summaaminen superpositio periaatteella (Julku 2011)

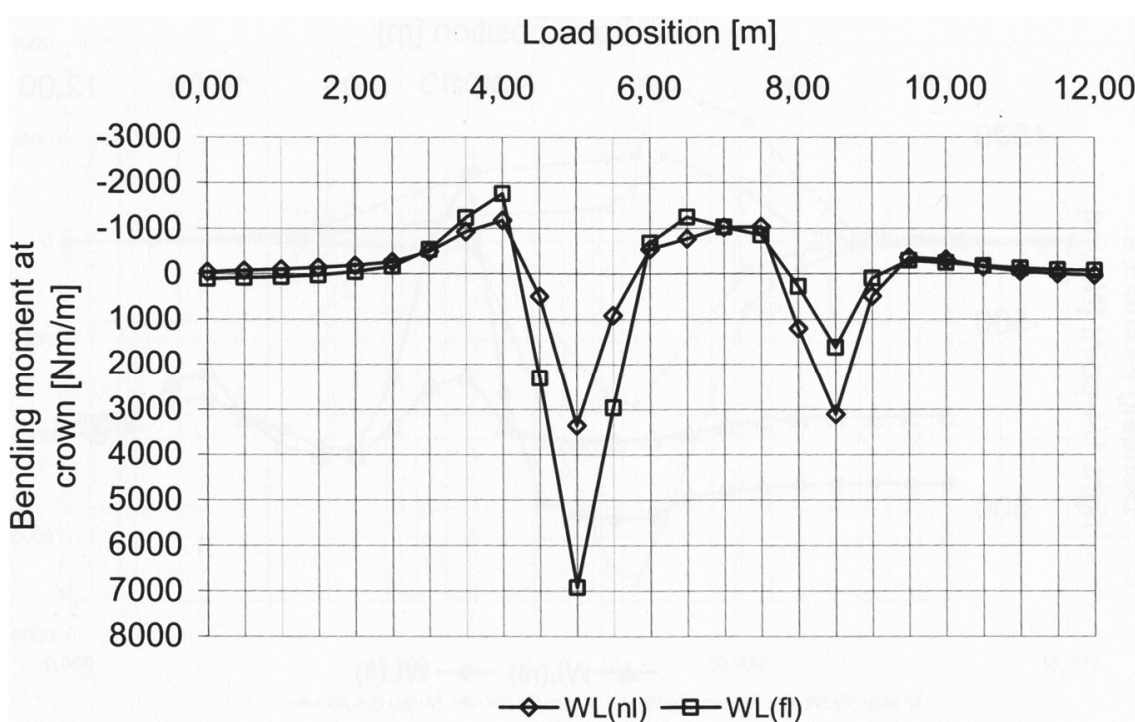
Ruotsalaisen putkisiltäkäsikirjan mukaan liikennekuorman aiheuttama itseisarvoltaan suurin negatiivinen momentti syntyy kun akseli on teräsputken reunimmaisen kohdan tasalla. Koska kuva 3.2. osoittaa että tämä teoria ei pidä täysin paikkaansa, pitää myös liikennekuorman teräsputkeen aiheuttama puristusjännitys ottaa huomioon. Teräsputken pienin jännitys lasketaan kaavalla 3.3.

$$\sigma_{\min} = -\frac{N}{A_y} - 0,5 \cdot \frac{M}{W_y} \quad (3.3)$$

missä

- | | |
|-------|--|
| N | on liikennekuorman aiheuttama normaalivoima [kN/m] |
| M | on liikennekuorman aiheuttama taivutusmomentti [kN·m/m] |
| A_y | on aallotetun teräsprofiilin poikkileikkauksen pinta-ala [mm ² /m] |
| W_y | on aallotetun teräsprofiilin poikkileikkauksen taivutusvastus [mm ³ /m] |

Väsytyksmitoituksessa käytettävän FLM4-kuormakaavion raskaiden ajoneuvojen akseliryhmät ovat osittain vastaavat, kuin kuvan 3.2 taivutusmomenttivaihtelun aiheuttanut kuorma-auto. Kuorman ollessa kohdassa 7,0 metriä, on akseleiden välillä suurin negatiivinen taivutusmomentti. Tämä momentti on huomattavasti pienempi, kuin 0,5 kertaa taivutusmomentin maksimiarvo. Kuten aiemmin todettiin, näiden negatiivisten taivutusmomenttihuippujen intensiteetti riippuu kuormittavan ajoneuvon fyysisten mittojen suhteesta putkisillan mittoihin. Päätös laskea jännitysvaihteluvälit väsytyksmitoituksessa kuormakaavion FLM4 yksittäisistä akseleista ja teliryhmistä antaa kuvan 3.2 perusteella varmalla puolella olevan lopputuloksen.



Kuva 3.2. Taivutusmomentti putken laella (Pettersson 2007)

Väsytyksmitoitusta varten laskettavaan jännitysvaihteluväliin saadaan tehdä standardissa puristaviin jännityksiin standardin SFS-EN 1993-1-9 (s.17 - 18) mukainen 40 % vähennys. Vähennys voidaan tehdä, koska teräsputkisillan aallotettu profiili on osittain tai kokonaan puristettu hitsaamaton rakenne. Lopullinen aallotetun teräsprofiilin jännitysvaihteluväli lasketaan kaavalla 3.4.

$$\Delta\sigma = |\sigma_{\max}| + 0,6 \cdot |\sigma_{\min}| \quad (3.4)$$

Tällä kaavalla voidaan laskea yksittäisen akselin tai telin aiheuttama jännitysvaihteluväli. Samaa kaavaa voidaan hyödyntää telikuorman aiheuttaman jännitysvaihteluvälin laskemiseen yhdistäen se periaatteisiin, jotka on esitetty kappaleessa 3.7 Yksinkertaistettu laskentamenetelmä ajoneuvoliikenteen väsyttävälle kuormille. Jos jännitysvaihteluvälin laskennasta halutaan tarkempi, pitää kahden tai useamman akselin samanaikaisista vaikutuksista teräsputkeen tutkia laajemmin kenttäkokeilla.

Väsytyksmitoituksessa voidaan ottaa huomioon ajoneuvojakauma kaistan poikisuuntaan (SFS-EN 1991-2). Tämän avulla saadaan pienempiä jännitysvaihteluvälejä,

mutta samalla myös tutkittavien väsytystapausten määrä kolminkertaistuu. Tekemieni vertailulaskelmien perusteella ajoneuvojen kaistan poikkisuuntaisen jakauman hyväksikäytöstä ei ole juurikaan hyötyä teräsputkisillan väsytyksimitoituksessa.

3.4.2 Lopullinen jännitysvaihtelu

Lopullista jännitysvaihteluväliä laskettaessa on huomioitava teräsputkeen mahdollisesti samanaikaisesti vaikuttavat akselikuormat. Yhteisvaikutukset voidaan laskea kahdesta tai useammasta akselista superpositioperiaatteella.

Teräsputkeen samanaikaisesti vaikuttavilla voimilla voi olla sekä kasvattavia, että pienentäviä vaikutuksia profiilin jännityksiin. Kuvassa 3.1. on esitetty yksinkertaistettuna miten jännitykset summautuvat pahimmassa ja parhaassa tapauksessa. Lopullinen jännitysvaihteluväli riippuu kuorman lisäksi putken halkaisijasta ja ylittävän ajoneuvon akselivälistä. Todellisuudessa jännitysvaihteluiden muutokset eivät ole lineaarisia, kuten kuvassa 3.1. on esitetty, vaan muuttuvat jouheasti koko matkalla.

3.5 Rakenneteräksen mitoitus

Teräsputkisillan rakenneteräs mitoitetaan standardin SFS-EN 1993-1-9 mukaan. Väsymisluokkana käytetään arvoa 160. Arvo on edellä mainitun standardin taulukon 8.1. mukainen. Väsymisluokka 160 on suurin mahdollinen rakenneteräksen väsymisluokka. Liitoskohdassa pitäisi käyttää saman taulukon mukaan väsymisluokalle arvoa 90.

Vanhojen suunnitteluohjeiden mukaisissa suunnitelmissa ei ole lainkaan tutkittu väsymiskestävyyttä rei'itetyssä poikkileikkauksessa. Suunnitteluohjeen uuteen versioon vaatimus tarkastuksesta päätettiin lisätä. Tarkastusvaatimukselle asetettiin kuitenkin rei'itykseen liittyvä lisäehto, jonka täytyessä ei väsytykskestävyyttä tarvitse erikseen tarkistaa.

3.6 Pulttiliitoksen mitoitus

Pulttiliitoksen väsytyksimitoitus osoittautui yhdeksi ongelmallisimmista kohdista koko projektissa. Rakennemalli, jossa liitokseen syntyvät rasitukset ovat suoraan verrannollisia aallotetun profiilin jäykkyyteen ja liitoksen pulttimäärään, aikaansaa pulttien rasitusten nopean kasvamisen rakenteiden muuttuessa jäykemmiksi. Koska pulttien sijoitteluun levyn reuna-alueilla ei voi rajattomasti vaikuttaa, vaan käytännössä pulttien reunaetäisyydet ovat aina vakiot, on jäykemmissä rakenteissa olevilla pulteilla huomattavasti suuremmat mitoitusvoimat.

Väsyttävistä kuormista syntyy pulttiliitoksen pultteihin sekä leikkaus-, että veto-rasitusta. Diplomityön ohessa tehdyissä vertailulaskelmissa ei kertaakaan syntynyt tilannetta, missä väsytyskuormakaavion FLM4 raskaat ajoneuvot olisivat aiheuttaneet pulttiin alemman väsymisrajan ylittäviä jännityksiä. Pultin normaalijännitys ylitti laskennallisesti useasti myös vakioamplitudisen väsymisrajan.

Standardin SFS-EN 1993-1-9 mukainen väsymisluokka pultin leikkaukselle on 100 ja normaalivoimalle 50. Aiemmista tutkimuksista löytyy kaksi lähdettä (Mohammed & Kennedy 2009 ja Jeun & Rhee 2007), joiden mukaan aallotetun teräslevyn liitos murtuu rakenneteräksen pettämiseen, ei pultin murtumiseen missään tilanteessa. Molempien edellä mainittujen tutkimusten mukaan pultin sijoittelulla on suurempi vaikutus rakenteen kestävyys, kuin pulttien määrällä. Osittain perinteistä pulttiliitosta parempi kestävyys selittyy tässä diplomityössäkin käsitellyllä liitoksen toiminnalla ja elastisuudella. Työryhmä päätyikin poikkeamaan eurokoodien yleisestä ohjeistuksesta ja korottaa pultin vetokestävyys väsymisluokan arvoon 80. Valitettavasti tämän projektin puitteissa ei ollut mahdollisuutta tutkia liitoksen toimintaa tarkemmin, todellisuutta tarkemmin vastaavan mitoituksen luominen vaatisi koekuormituksia, joissa mitattaisiin liitoksen liikkeitä ja kiertymiä suhteessa vaikuttavaan voimaan.

Pultteihin samanaikaisesti syntyvää leikkaus- ja vetorasitusta ei mielestäni ole tarpeellista tutkia, koska leikkausrasitukset ovat minimaalisia. Jos yhteisvaikutus kuitenkin halutaan tutkia, voidaan se tehdä tässä diplomityössä myöhemmin esitettävällä kaavalla.

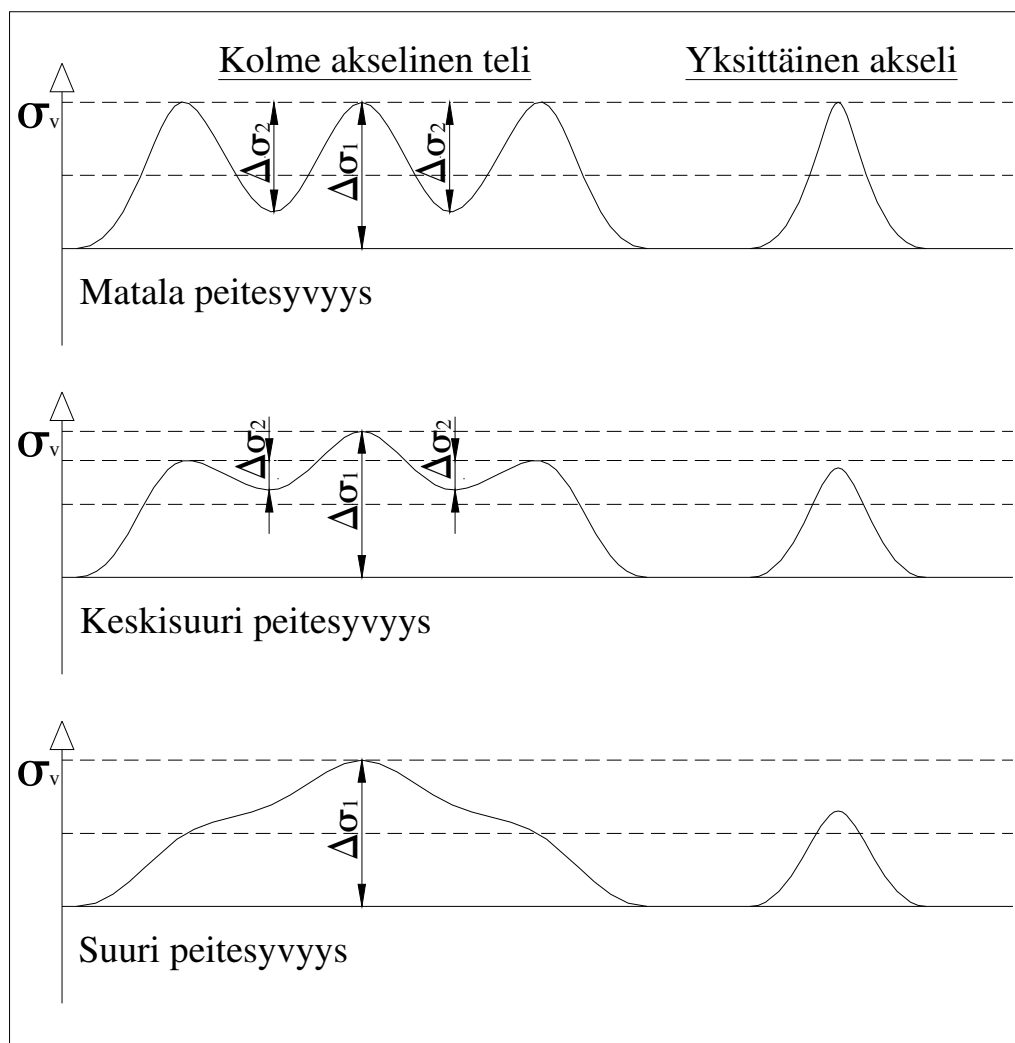
3.7 Yksinkertaistettu laskentamenetelmä ajoneuvoliikenteen väsyttävälle kuormille

Väsytykskestävyyden yksinkertaistetussa laskentamallissa on laskettu väsytyskuorma-kaavion FLM4 mukaisten raskaiden ajoneuvojen aiheuttamat akselikohtaiset jännitysvaihteluvälit. Mitoitusajoneuvoissa olevien kahden ja kolmen akselin telien aiheuttamat yhdistetyt jännitysvaihteluvälit on huomioitu kaikilla peitesyvyyksillä. Telikuorman aiheuttamiksi jännitysvaihteluväleiksi on otaksuttu telin aiheuttama maksimijännitys puolitoistakertaisena.

Kuvassa 3.3. on esitetty pystysuoran maanpaineen vaihtelut kolmiakselisen telin ylittäessä teräsputkisillan lakea. Peitesyvyyden kasvaessa pienentyvät toiset jännitysvaihteluvälit ja lopulta telikuorma aiheuttaa vain yhden jännitysvaihteluvälin. Kuvasta 3.3. nähdään myös miten maan pystysuora jännitys kasvaa telikuorman alla suhteessa yksittäisen akselin aiheuttamaan jännitykseen. Vain kaksi- ja kolmiakselisille telikuormille tehdään kuvan 3.3. mukainen yhteisvaikutustarkastelu sillansuunnassa.

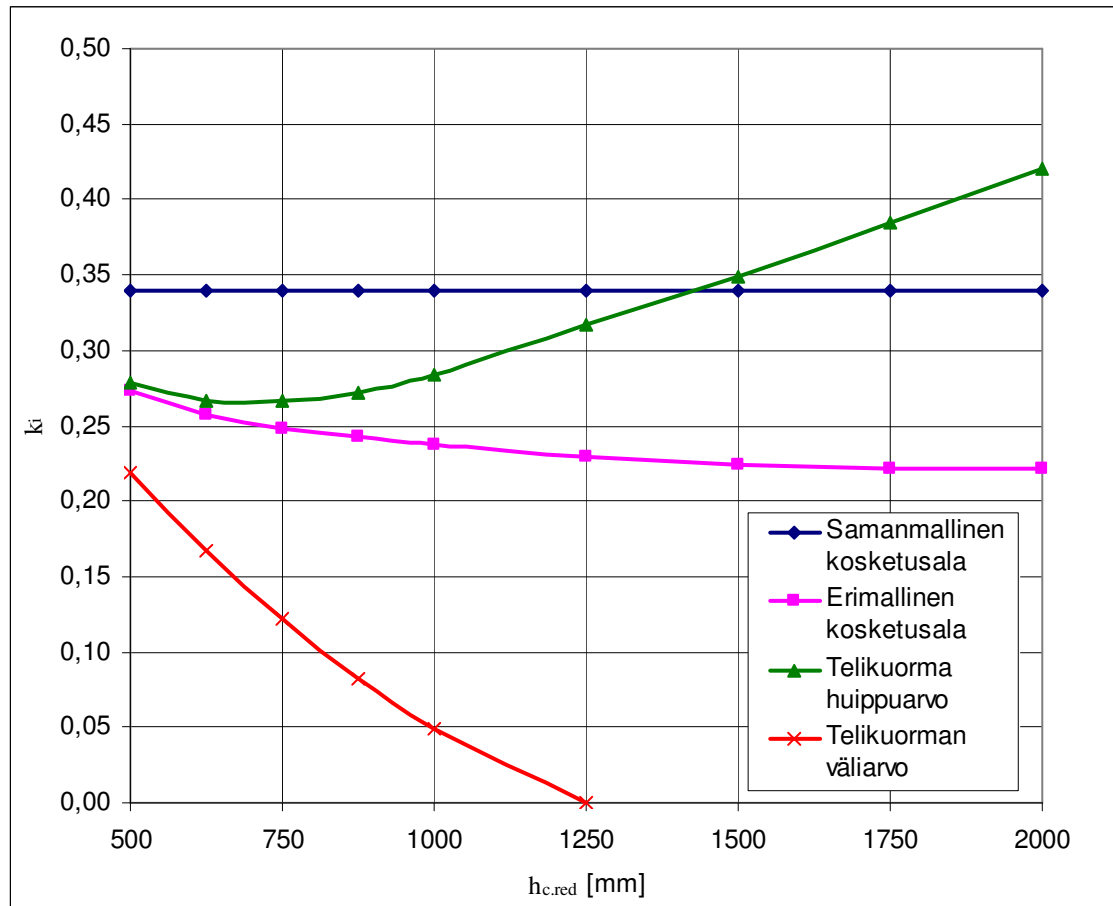
Kaistan poikkisuunnassa suurimmat jännitykset ovat suoraan renkaan kosketuspinnan alapuolella, jos peitesyvyys on vähemmän kuin 1,5 metriä.

Aallotettujen teräsputkisiltojen voimasuureiden laskennan perustuessa Petterssonin kehittämään ekvivalenttiin viivakuormaan (p_{traffic}), voidaan voimasuureet laskea ainoastaan yhdessä putken pisteessä kerrallaan. Todellista kahden akselin yhteisvaikutusta ei voida laskea, jos akselit eivät aiheuta jännityksiä samaan pisteeseen maassa.



Kuva 3.3. Jännitysvaihtelu maassa kolme akselisen telin alla (Julku 2011)

Aallotettuun teräsputkeen syntyvät jännitykset lasketaan Petterssonin (2010) esittämän ekvivalentin viivakuorman avulla (p_{traffic}). Lopullista väsyysmitoitusta varten tarvitaan jokaisen yksittäisen akselin aiheuttaman jännitysvaihteluvälin lisäksi telikuormien aiheuttamat jännitysvaihteluvälit, jotka lasketaan edellä mainitulla tavalla. Valintaa akselien ja telien huomioimisesta on perusteltu liitteessä 5. Kunkin akselin tai telin aiheuttama jännitysvaihteluväli riippuu teräsputken peitesyvyydestä, akselin massasta ja renkaan kosketusalasta. Koska mitoitussajoneuvojen renkaiden kosketusalat vaihtelevat (taulukko 3.2.), eivät eripainoisten akselien aiheuttamat jännitysvaihtelut muutu samassa suhteessa toisiinsa nähden peitesyvyyden muuttuessa. Kuvassa 3.4. on esitetty, mikä vaikutus erikokoisella kosketuspinnalla ja telikuormalla on jännitysvaihteluiden suhteeseen.



Kuva 3.4. Jännitysvaihteluvälin kerroin redusoidun peitesyvyyden funktiona (Julku 2011)

Kuvan 3.4 mukaiset sovituskerroimet on laskettu kaikille taulukon 3.1. raskaiden ajoneuvojen akseleille ja teleille (liite 2). Tällä kertoimella (k_i) saadaan kuormituskaavio-
on LM2 aiheuttamasta jännitysvaihteluvälistä akselikohtaiset jännitysvaihteluvälit.

Oletetaan kaikkien akseli- ja telikuormien aiheuttamien jännitysvaihteluvälien olevan vakioamplitudisen ja alemman jännitysrajan (kuva 3.6.) välillä. Tällöin väsymiskes-
tävyys voidaan tarkistaa Minerin kumulatiivisella vaurioteorialla.

$$\sum_i \frac{n_i}{N_{Ri}} \leq 1,0 \Leftrightarrow \sum_i \frac{\alpha_i \cdot N}{\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_{Ri}} \right)^5 \cdot 5 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad (3.5)$$

missä

α_i on akselikohtainen kuormituskertojen määrän kerroin

N on raskaiden ajoneuvojen kokonaismäärä sillan koko käyttöänsä aikana

$\Delta\sigma_{Ri}$ on akselikohtainen jännitysvaihteluväli [MPa]

$\Delta\sigma_D$ on vakioamplitudisen väsymisrajan suunnitteluarvo [MPa]

$$\sum_i \frac{\alpha_i \cdot N}{\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_{Ri}}\right)^5 \cdot 5 \cdot 10^6} \leq 1,0 \Leftrightarrow \frac{N}{\Delta\sigma_D^5 \cdot 5 \cdot 10^6} \cdot \sum_i \alpha_i \cdot (k_i \cdot \Delta\sigma_R)^5 \leq 1,0 \quad (3.6)$$

missä

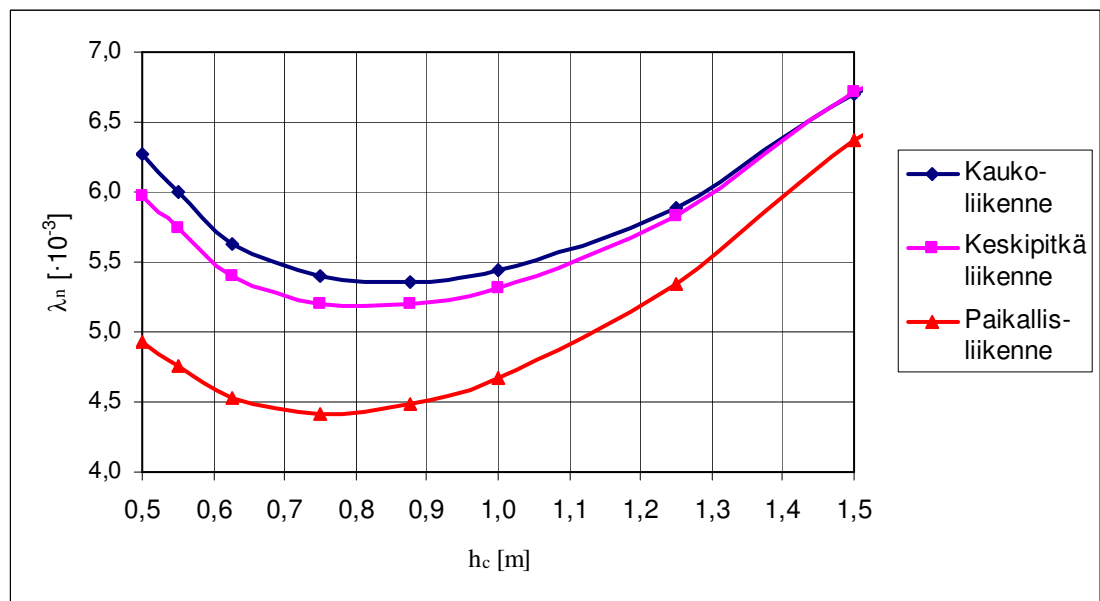
$\Delta\sigma_R$ on kuormakaavion LM2 aiheuttama jännitysvaihteluväli [MPa]

k_i on akselikohtainen jännitysvaihteluvälin kerroin (Liite 2)

$$\frac{N}{\Delta\sigma_D^5 \cdot 5 \cdot 10^6} \cdot \sum_i \alpha_i \cdot (k_i \cdot \Delta\sigma_R)^5 \leq 1,0 \Leftrightarrow \frac{\Delta\sigma_R^5 \cdot N}{\Delta\sigma_D^5 \cdot 5 \cdot 10^6} \cdot \sum_i \alpha_i \cdot k_i^5 \leq 1,0 \quad (3.7),$$

$$\lambda_n = \sum_i \alpha_i \cdot k_i^5 \quad (3.8)$$

Summalauseke (kaava 3.8) on esitetty liikennetyypeittäin peitesyvyyden funktiona kuvassa 3.5.



Kuva 3.5. λ_n -kerroin liikennetyypeittäin (Julku 2011)

Yksinkertaistettu väsymiskestävyyden mitoituskaava voidaan kirjoittaa muodossa:

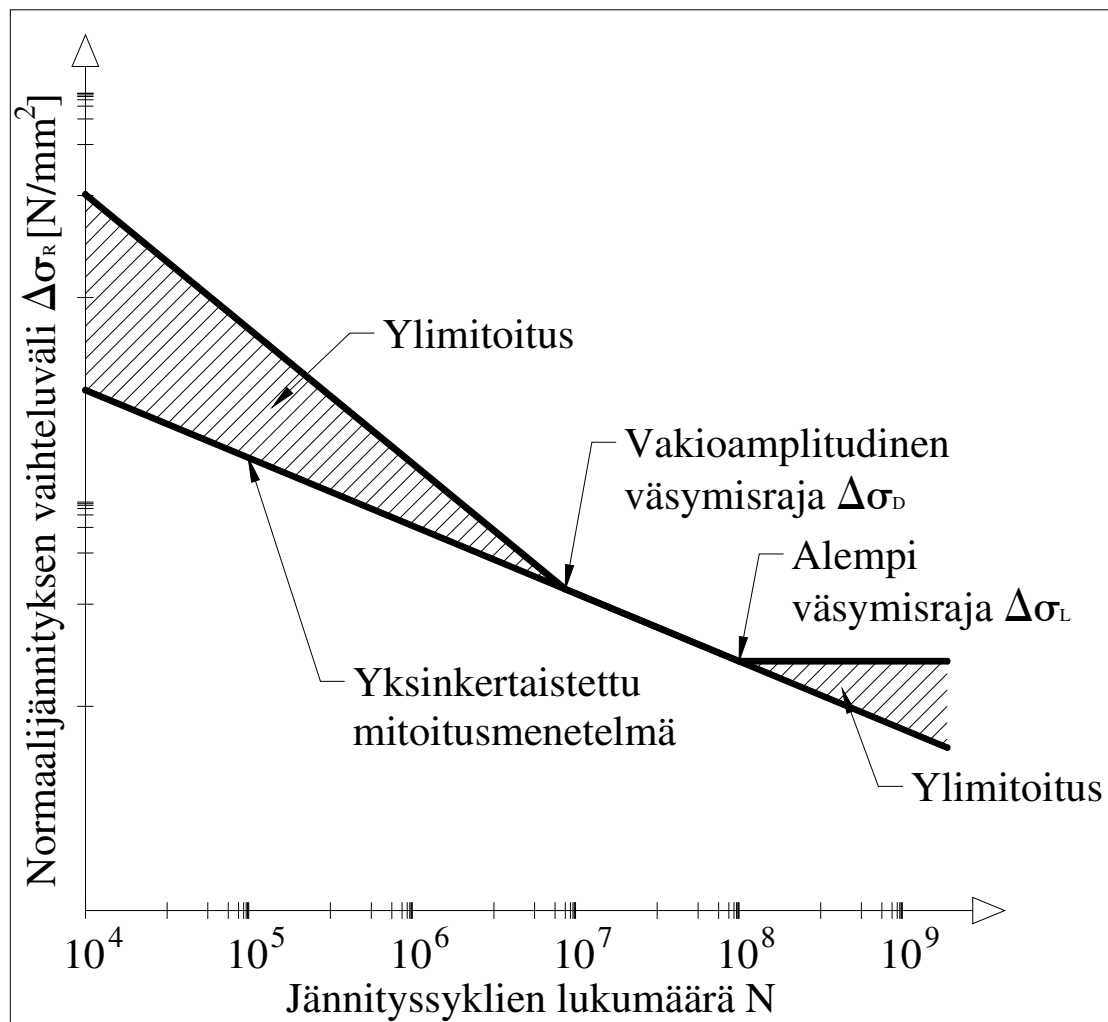
$$\lambda_n \cdot \frac{\Delta\sigma_{LM2}^5 \cdot N}{\Delta\sigma_D^5 \cdot 5 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad (3.9)$$

missä

$\Delta\sigma_{LM2}$ on kuormakaavion LM2 aiheuttama jännitysvaihteluväli [MPa]

Edellä johdettu kaava antaa tarkan tai varmalla puolella olevan tuloksen kaikissa tapauksissa. Kuitenkin lähes kaikissa todellisissa tapauksissa ainakin osa mitoitusajoneuvojen aiheuttamista jännitysvaihteluväleistä on suurempia kuin vakioamplitudinen vä-

symisraja tai pienempi kuin alempi väsymisraja (kuva 3.6.). Tämä asia kannattaa ottaa huomioon mitoituksessa. Käyttöasteen redusointi tehdään kertoimella λ_σ , joka riippuu suuriman jännitysvaihteluvälin $\Delta\sigma_{LM2}$ suhteesta vakioamplitudisen väsymisrajan mitoitustarvoon $\Delta\sigma_D$.



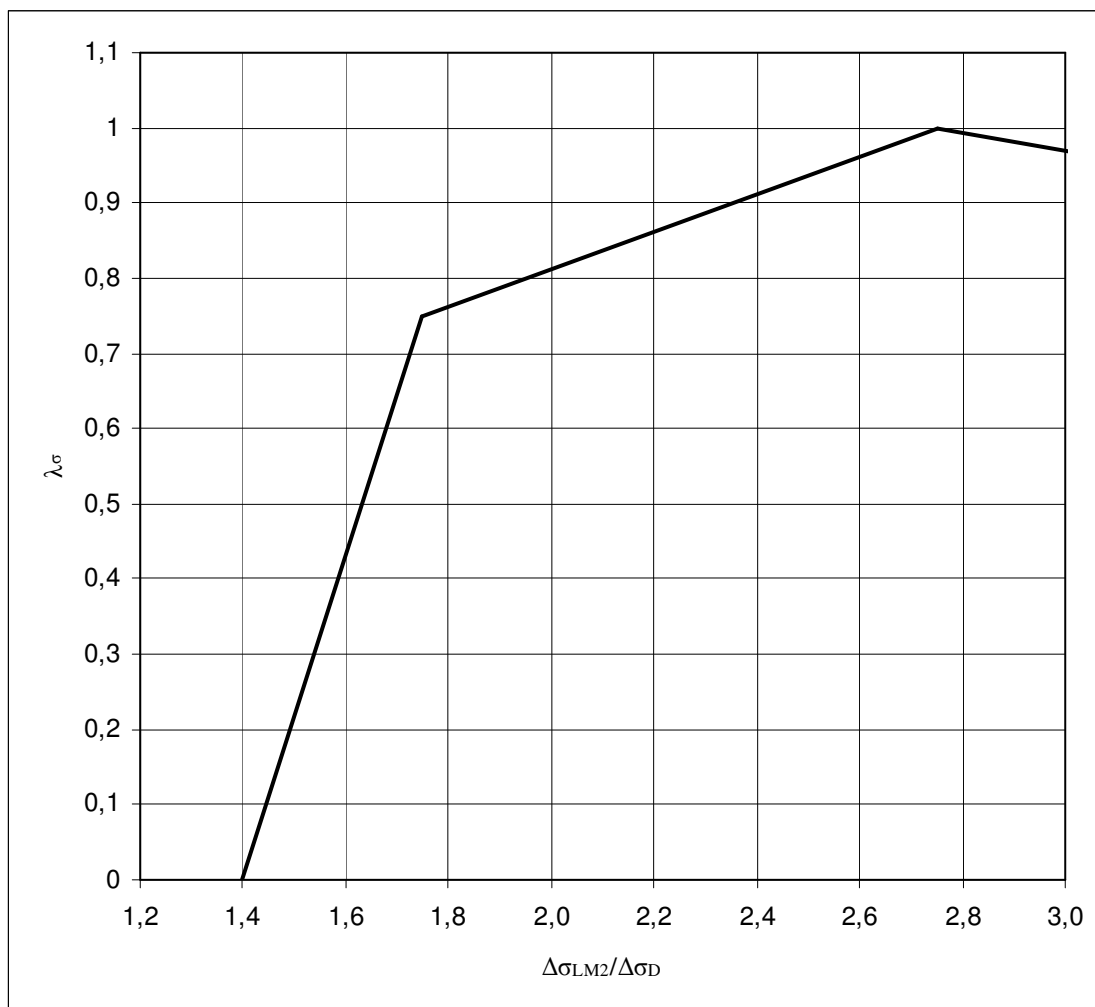
Kuva 3.6. Yksinkertaistetun mitoitusmenetelmän ylimitoitus (Julku 2011)

Vakioamplitudisen ja alemman väsymisrajan ulkopuolella olevien jännitysvaihteluvälien määrä riippuu sekä suurimmasta jännitysvaihteluvälistä, että teräsputken peitesyvyydestä. Jännitysvaihteluvälit eivät muutu aina samassa suhteessa toisiinsa nähden, vaan esimerkiksi teräsputken peitesyvyys vaikuttaa vakioamplitudisen ja alemman väsymisrajan välillä olevien jännitysvaihteluiden määrään. Kaikki jännitysvaihteluvälit, jotka ovat edellä mainittujen väsymisrajojen ulkopuolella, tulevat yksinkertaistetulla mitoitusmenetelmällä ylimitoitetuiksi. Koska sovituserrointa λ_σ ei voitu määrittää matemaattisesti, on se tehty kokeellisesti.

Taulukko 3.3. λ_σ -kerroin, katso myös kuva 3.7. (Julku 2011)

Perusaine				
$\frac{\Delta\sigma_{LM2}}{\Delta\sigma_D}$	$\leq 1,4$	1,80	2,76	$\geq 3,30$
λ_σ	0	0,77	1,00	0,90
Pultit				
$\frac{\Delta\sigma_{LM2,b}}{\Delta\sigma_{D,b}}$	$\leq 1,4$	1,80	2,76	$\geq 3,30$
$\lambda_{\sigma,b}$	0	0,77	1,00	0,90
$0,737 \cdot \frac{\Delta\tau_{LM2,b}}{\Delta\tau_{C,b}}$	$\leq 1,4$	1,80	$\geq 2,76$	-
$\lambda_{\tau,b}$	0	0,77	1,00	-

Kertoimen määrittämistä varten laskettiin väsymiskestävyyden käyttöaste tarkalla menetelmällä. Tarkkana menetelmänä käytettiin kappaleessa 3, esitettyjä jännitysvaihteluiden kertymistä ja yhdistämistä. Samoilla lähtötiedoilla laskettiin käyttöasteet yksinkertaistetun menetelmän kaavalla 3.9. Näiden käyttöasteiden suhteet laitettiin kaavioon jännitysvaihteluvälin $\Delta\sigma_{LM2}$ ja vakioamplitudisen väsymisrajan mitoitusarvoon $\Delta\sigma_D$ suhteen funktiona. Näiden pisteiden perusteella muodostettiin paloittain lineaarinen kuvaaja, jolta kerroin λ_σ voidaan ottaa mitoitukseen. Kertoimen λ_σ suhtautuminen laskettuihin käyttöasteiden suhteisiin on esitetty liitteessä 1. Jännitysvaihteluvälin redusointikerroin voidaan katsoa taulukosta 3.3. tai kuvasta 3.7.



Kuva 3.7. λ_σ -kerroin (Julku 2011)

Aallotetun teräsprofiilin väsymiskestävyys voidaan tarkistaa kaavalla:

$$\lambda_\sigma \cdot \lambda_n \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_{LM2}}{\Delta\sigma_D} \right)^5 \cdot \left(\frac{N}{5 \cdot 10^6} \right) \leq 1,0 \quad (3.10)$$

missä

- λ_σ on suurten ja pienien jännitysten redusointi kerroin (kuva 3.7. tai taulukko 3.3)
- λ_n on eri akseleiden vaikutuksen huomioiva kerroin (kuva 3.5.)
- $\Delta\sigma_{LM2}$ on kuormakaavion LM2 aiheuttama jännitysvaihteluväli [MPa]
- $\Delta\sigma_D$ on vakioamplitudisen väsymisrajan suunnitteluarvo [MPa]
- N on raskaiden ajoneuvojen kokonaismäärä putkisillalla sen käyttöiän aikana

Kaava 3.10 on voimassa jos:

1. Teräsputken jännemitta on $2 \text{ m} \leq D \leq 8 \text{ m}$
2. Redusoitu peitesyvyys on $0,5 \text{ m} \leq h_{c,\text{red}} \leq 1,5 \text{ m}$
3. Ympäristäytöt on tehty Teräsputkisillat-ohjeen mukaan

Lisäksi väsymiskestävyydestä on todennettava Standardin SFS-EN 1993-1-8 mukainen ehto (kaava 3.11).

$$\Delta\sigma_{\text{FLM4,max}} \leq 1,5 \cdot f_y \quad (3.11)$$

missä

$\Delta\sigma_{\text{FLM4,max}}$ on suurin väsymiskuormakaavion FLM4 aiheuttama jännitysvaihteluväli.

Suurin jännitysvaihteluväli voidaan laskea kaavalla 3.12

$$\Delta\sigma_{\text{FLM4,max}} = 0,40 \cdot \Delta\sigma_{\text{LM2}} \quad (3.12)$$

missä

0,40 on varmalla puolella oleva kerroin väsytyskuormakaavio FLM4:n aiheuttaman jännitysvaihteluvälin laskemiseksi LM2 kuormasta, jos peitesyvyys on alle 1,5 m

Liitososille yksinkertaistettu väsytysmitoitus voidaan tehdä samoilla periaatteilla kuin rakenneteräkselle. Pultin väsytykskestävyyttä tarkasteltaessa on huomioitava muutuneet väsymisluokat. Pultin leikkauksen väsymisluokka on Standardin SFS-EN 1993-1-8 taulukon 8.1 mukainen. Pultinsuuntainen väsymisluokka on edellä mainitusta standardista poiketen 80 MPa.

Pultin väsymislaskentaa varten voidaan johtaa yksinkertaistettu kaava samoilla matemaattisilla perusteilla kuin rakenneteräkselle. Sovituskertoimista λ_n on kaikille väsytyssuureille sama. Suurten ja pienten jännitysten redusointia varten johdettu kerroin on erilainen leikkaus- ja normaalijännityksille. Leikkausjännityksiä voidaan redusoida ainoastaan pienillä jännitystasoilla. Tämä johtuu jännityksillä olevista erilaisista väsymislujuuden käyristä. Pulttiliitoksen väsytysmitoituksessa käytettävät redusointikertoimet on esitetty kuvassa 3.5. ja taulukossa 3.3.

Pultin leikkauskestävyyden väsytyksmitoitusta voidaan tehdä kaavalla 3.14 ja normaallivoiman väsytyksmitoitusta kaavalla 3.13. Jos leikkauskestävyyden käyttöaste eroaa nolasta (0), edellisten yhteisvaikutus tarkistetaan kaavalla 3.15.

$$S_1 = \lambda_{\sigma,b} \cdot \lambda_n \cdot \frac{\Delta\sigma_{LM2,b}^5}{\Delta\sigma_{D,b}^5} \cdot \frac{N}{5 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad (3.13)$$

$$T_1 = \lambda_{\tau,b} \cdot \lambda_n \cdot \frac{\Delta\tau_{LM2,b}^5}{\Delta\tau_{C,d,b}^5} \cdot \frac{N}{2 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad (3.14)$$

missä

$$\Delta\sigma_{D,b} = 0,737 \frac{\Delta\sigma_{C,b}}{\gamma_{Mf}}$$

$$\Delta\tau_{C,d,b} = \frac{\Delta\tau_{C,b}}{\gamma_{Mf}}$$

$\Delta\sigma_{C,b}$ on väsymisluokka pultin vedolle [MPa]

$\Delta\tau_{C,b}$ on väsymisluokka pultin leikkaukselle [MPa]

$\lambda_{\sigma,b}$ on väsyttävän kuorman ja väsymisluokan suhteesta riippuva korjauskerroin $0 < \lambda_{\sigma,b} < 1,0$, taulukko 3.3.

$\lambda_{\tau,b}$ on väsyttävän kuorman ja väsymiskestävyyden suhteesta riippuva korjauskerroin $0 < \lambda_{\tau,b} < 1,0$, taulukko 3.3.

λ_n on peittosyvyydestä ja liikennetyypistä riippuva kerroin, kuva 3.5

$\Delta\sigma_{LM2,b}$ on kuormakaavion LM2 aiheuttama pulttien vedon jännitysvaihteluväli [MPa]

$\Delta\tau_{LM2,b}$ on kuormakaavion LM2 aiheuttama pulttien leikkauksen jännitysvaihteluväli [MPa]

γ_{Mf} on osavarmuusluku taulukon 2.1 mukaan

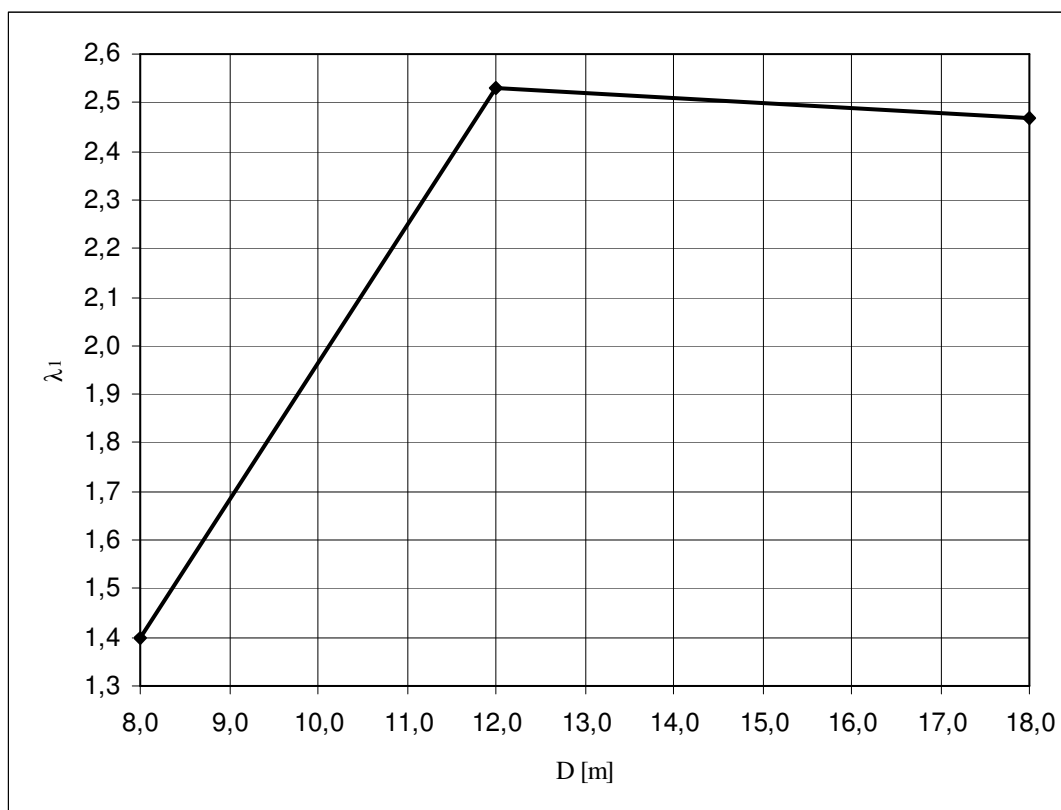
N on raskaiden ajoneuvojen kokonaismäärä putkisillalla sen suunnitellun käyttöiän aikana.

$$T_1 + \frac{S_1}{1,4} \leq 1,0 \quad (3.15)$$

Teräsputkisillan väsymiskestävyyden laskentaan voidaan käyttää edellä kuvattua yksinkertaistettua laskentamenetelmää. Laskentamenetelmällä saadaan konservatiivisia tuloksia kaikissa tapauksissa. Tehdyissä vertailulaskelmissa erot tarkan ja yksinkertaistetun menetelmän välillä olivat suurimmillaan kolmen (3) prosentin suuruisia. Jos huomioidaan väsymisilmiön tulkinnassa olevat tunnetut epävarmuustekijät, voidaan tätä tarkkuutta pitää riittävänä.

Tässä diplomityössä johdettu yksinkertaistettu väsymismitoitusmenetelmä on toimiva ainoastaan rakennemallilla, jossa huomioidaan liikennekuormasta syntyvät jännitystilat ekvivalentin viivakuorman perusteella. Tehtyjen tutkimusten perusteella on rakennemallissa huomioitu ainoastaan raskaiden mitoitussajoneuvojen yksittäiset akselit ja telikuormat.

Jännemitaltaan yli 8 metristen teräsputkisiltojen FLM4-väsytkuormakaavion mukaisessa väsytsmitoituksessa pitää samanaikaisesti sillalla vaikuttavien akselikuormien yhteisvaikutusta tutkia tarkemmin kuin edellä on esitetty. Tästä syystä teräsputkisiltaohjeen päivitystyöryhmässä päätettiin suurempien teräsputkisiltojen mitoitus tehdä väsytkuormakaavion FLM3 mukaan. Väsytkuormakaaviot FLM3 ja FLM4 eroavat kuitenkin niin radikaalisti toisistaan, että kuormakaavioiden rajapinta päätettiin sovittaa toisiinsa. Sovitus tehtiin muokkaamalla väsytkuormakaavion FLM3 laskennassa käytävää kerrointa λ_1 . Muokattu kerroin on esitetty kuvassa 3.8.



Kuva 3.8 Muokattu kerroin λ_1 (Julku 2011)

Teräsputkisiltojen, joiden jännemitta on yli 8 metriä, väsytsmitoitus tehdään kuormakaaviolla FLM3. Mitoituksen perusteet otetaan Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet ohjeesta sekä standardista SFS-EN 1993-2. Edellä mainitussa standardissa olevaa λ_1 -kerrointa kuitenkin muutetaan, kuten edellä todettiin.

4 MITOITUSMENETELMÄT SUUNNITTELUOHJETTA VARTEN

4.1 Suunnittelun lähtötiedot

Aallotettujen teräsputkisiltojen rakennelaskelmissa kuormina käytetään Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet (2010) julkaisun mukaisia kuormituskaavioita. Tieliikenteen teräsputkisilloissa tarkistetaan kestävyys kuormakaavioille LM1, LM2 ja LM3. Teräsputkisiltatyöryhmän esityksen mukaan kuormakaavioiden LM1 ja LM2 akseli- ja pinta-kuormaa voidaan pienentää kertoimella α_1 , jonka arvo muuttuu lineaarisesti $[0,8 \dots 1,0]$, kun putkisillan jännemitta muuttuu välillä $[2,0 \dots 6,0 \text{ m}]$. Kuormakaaviota LM3 voidaan aina pienentää kertoimella 0,8. Valtionapua saavien yksityisteiden siltien suunnittelussa kuormakaavion LM1 akseli- ja pinta-kuormaa voidaan pienentää kertoimilla α_{qi} ja α_{Qi} (Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet 2010). Kuormakaaviolla LM2 vastaavat kertoimet ovat: β_{qi} ja β_{Qi} (emt.). Kertoimia: α_{qi} , α_{Qi} , β_{qi} ja β_{Qi} ei saa käyttää samanaikaisesti kertoimen α_1 kanssa.

Radan alle tulevat putkisillat mitoitetaan luokitellulle kuormakaaviolle LM71-35. Ekvivalentti viivakuorma p_{traffic} lasketaan määräävän raiteen keskilinjalla, kuten Teräsputkisillat -ohjeen vanhassa versiossa on esitetty.

Kevyen liikenteen väylien teräsputkisillat on mahdollista suunnitella pelkille kevyen liikenteen siltien kuormille, jotka ovat: tasaisesti jakautunut ja pistekuorma, sekä huoltoajoneuvon paino. Jos maahan upotettu aallotettu teräsputki suunnitellaan paikkaan, mihin ei ole ajoneuvoilla pääsyä, voidaan se suunnitella pelkille pysyville kuormille.

Kaikille liikennekuormille on laskettu ekvivalentit viivakuormat peitesyvyyksille 0,5 m - 9,5 m. Näistä p_{traffic} -arvoista on esitetty kuvaajat liitteessä 3. Kuormakaavion LM1 ekvivalentin viivakuorman kanssa samanaikaisesti tulee käyttää tasaista pinta-alakuormaa, jonka suuruus on $9,0 \text{ kN/m}^2$. Kuormakaavion LM3 aiheuttamat rasitukset voidaan laskea p_{traffic} -arvon avulla tai vaihtoehtoisesti käyttämällä soveltamisohjeen Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet mukaista 45 kN/m^2 tasaista pinta-alakuormaa.

Liikennekuormien lisäksi teräsputkisillan suunnittelussa pitää huomioida täyttötöystä, maanpaineesta ja työnaikaisista kuormista syntyvät rasitukset.

Teräsputkisillan eurokoodien ja kansallisen soveltamisohjeen mukaista suunnittelua varten on kerätty materiaalien ja kuormien osavarmuuskertoimet taulukkoon 2.1.

Väsytsmitoituksessa käytetään väsytskuormakaaviota FLM1 tai FLM4. Väsytskuormakaaviolla on mahdollista tarkistaa teräsputken rajaton kestoikä väsyttävillä kuormilla. Kuitenkin lähes aina mitoitus joudutaan tekemään kuormakaaviolla FLM4. Tämän kuormakaavion raskaiden ajoneuvojen jakaumana käytetään standardin SFS-EN

omainen ei ole muuta määrännyt. Tarvittaessa voidaan esimerkiksi yksityisteiden silloilla käyttää liikenteen tyyppinä paikallisliikenteen raskaiden ajoneuvojen jakaumaa. Perusaineen väsymisluokka on 160 MPa (SFS-EN 1993-1-9 Taulukko 8.1).

Teräsputkisiltojen rakenneteräksen väsytsmitoitus voidaan tehdä tässä diplomityössä esitellyllä yksinkertaistetulla laskentamenetelmällä. Edellytykset yksinkertaistetun menetelmän käyttöön on esitetty kohdassa 3.7. Muut tapaukset pitää mitoittaa tapauskohtaisesti käyttämällä väsytskuormakaaviota FLM4. Tämän väsytskuormakaavion akseli- ja telikuormille on laskettu valmiit kertoimet, joilla niiden ekvivalentit viiva-kuormat voidaan laskea kuormakaavion LM2 pohjalta. Väsytskuormakaavion FLM4 kertoimet on esitetty liitteessä 2.

Pulttiliitoksen väsytskestävyyden mitoittaa käytännössä aina pultin kestävyys väsyttävälle vetojännitykselle. Vetojännityksen vaihteluväliä laskettaessa huomioidaan, että pulttiin ei synny puristusjännitystä. Puristusjännitykset välittyvät aallotetun teräsprofiilin kautta. Normaaliveomakestävyyden lisäksi pultista pitää aina tarkistaa myös leikkauskestävyys, sekä edellisten yhdistetty kestävyys. Väsymisluokkana pultin suunnassa käytetään eurokoodista poiketen korotettua 80 MPa arvoa. Pultin leikkauksen väsymisluokka on 100 MPa (SFS-EN 1993-1-9 Taulukko 8.1). Liitososien materiaalin osavarmuuskertoimenä käytetään 1,0, kun putkisillan jännemitta on kaksi (2) metriä ja 1,15, kun jännemitta on vähintään kuusi (6) metriä. Osavarmuuskertoimen arvot muille jännemitoille interpoloidaan lineaarisesti

Väsytsmitoituksessa käytetään samaa rakennemallia kuin staattisessa mitoituksessa, mutta maamodulia voidaan korottaa kymmenellä (10) prosentilla. Rakenneteräkseseen ja pultteihin syntyvät jännitystilat lasketaan samoilla periaatteilla kuin staattisessa tilassa.

Erikoistapauksissa, kuten pitkäjännemittaisille suorajalkaisille kehille, voidaan väsytskestävyys laskea käyttämällä esimerkiksi vesisäiliöanalogiaa. Tämän avulla voidaan huomioida profiilissa oleva perusjännitys, josta on hyötyä joissain tapauksissa. Tarvittaessa voidaan usean akselin yhteisvaikutusta tutkia esimerkiksi FEM-mallin avulla.

4.3.2 Raideliikenteen putkisillat

Viranomaisten vaatimuksesta raideliikenteen teräsputkisiltojen väsytsmitoitus tehdään varman kestämissen periaatteella ja suurilla vaurion seurauksilla (SFS-EN 1993-1-9 s. 11). Vaatimus on perusteltu, koska raideliikenteen silloilta vaaditaan pidempää ja varmempaa toimivuutta kuin tieliikenteen silloilta. Aineosavarmuuslukuna (γ_{MF}) käytetään arvoa 1,35.

Mitoittava jännitysvaihteluväli lasketaan standardin SFS-EN 1993-2 (Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 2: Terässillat) mukaan. Suurin ja pienin jännitystila teräsputkessa lasketaan samoilla periaatteilla kuin tieliikenteen putkisilloissa (kaavat 3.2, 3.3 ja 3.4). Saatua jännitysvaihteluväliä redusoidaan eurokoodi 3:n, osan 2 mukaan (kaava 4.2).

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \leq 1,4 \quad (4.2)$$

missä

λ_1	on liikenteen aiheuttama vauriovaikutuskerroin ja se riippuu vaikutusviivan pituudesta
λ_2	on kerroin joka huomioi liikenteen määrän
λ_3	on kerroin joka huomioi putkisillan suunnitellun käyttöiän
λ_4	on kerroin joka huomioi rakenneosaa mahdollisesti kuormittavat useammat raiteet

Liikenneviraston edustajalta saamieni ohjeiden mukaan, kerroin λ_1 saadaan standardin SFS-EN 1993-2 taulukosta 9.4 sarakkeesta 25 t Mix. Vaikutusviivan kriittisenä pituutena käytetään putkisillan jännemittaa. Kertoimien λ_2 ja λ_3 arvot saadaan edellä mainitun standardin taulukoista 9.5 ja 9.6. Koska raideliikenteen putkisillan mitoitus tehdään aina määräävän raiteen keskilinjalla, pitää putkisilloilla käyttää λ_4 :n arvona 1,0. Raideliikenteen putkisiltojen väsytykestävyys tarkastetaan kaavalla 4.3.

$$\frac{\lambda \cdot \Delta\sigma}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} \leq 1,0 \quad (4.3)$$

missä

λ	on jännitysvaihteluvälin redusointi kerroin (kaava 4.2)
$\Delta\sigma$	on junakuorman aiheuttama jännitysvaihteluväli
$\Delta\sigma_c$	on väsymisluokka
γ_{Mf}	on aineosavarmuusluku väsytyksmitoituksessa

5 YHTEENVETO

5.1 Vertailulaskelmat

5.1.1 Lähtötiedot

Alkuperäisen projektisuunnitelman mukaan tehtiin vertailulaskelmat vanhan ohjeen ja eurokoodin mukaisille käyttöasteille. Ongelmakohtien havaitsemiseksi on tehty lukuisia vertailulaskelmia projektin edetessä. Tähän diplomityön osioon on koottu vain lopullisten laskentaperusteiden mukaiset tulokset.

Vertailulaskelmat on tehty pyöreälle putkiprofiilille. Teräsputken halkaisijoina on käytetty 2, 4 ja 6 metriä. Peitesyvyys vaihtelee välillä 0,5 - 3,0 metriä. Erilaisia yhdistelmiä on yhteensä 18 kappaletta. Laskelmissa käytetty teräsprofiili riippuu teräsputken halkaisijasta ja sen peitesyvyydestä. Teräsprofiilina on käytetty kierresaumattua 270 x 20/125-profiilia ja monilevy 55 x 200-profiilia. Profiilin ainevahvuus on valittu vanhan suunnitteluohjeen mukaan. Eurokoodin mukaisessa väsytsmitoituksessa on 0,5 metrin peitesyvyydellä käytetty liikenteenluokkaa 3 ja kaikissa muissa tapauksissa ankarinta liikenteenluokkaa 1. Suunniteltu käyttöikä on kaikissa laskelmissa 50 vuotta. Kaikissa tapauksissa ympäristäytön materiaaliominaisuudet vastaavat murskeen ominaisuuksia.

Rakenneteräksen käyttöasteet on laskettu murtorajatilassa sekä suunnitteluohjeen, että standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaisella kaavalla. Näitä tuloksia vertaamalla nähdään mikä on yhteisvaikutuskaavan todellinen merkitys käytännön mitoituksessa.

Vertailuissa on ensin laskettu rakenteen kestävyys vanhan suunnitteluohjeen mukaisilla perusteilla. Samoilla lähtöarvoilla on laskettu uuden suunnitteluohjeen mukaiset käyttöasteet. Uuden suunnitteluohjeen mukaisessa mitoituksessa on muutettu ainoastaan väsytsmitoituksessa käytettävää liikenteenluokkaa.

5.1.2 Tulokset

Vertailulaskelmien tulokset on koottu liitteeseen 6. Kokonaisuutena mitoitus tulee muuttumaan kevyempään suuntaan. Uuden suunnitteluohjeen mukaan tehdyn staattisen mitoituksen käyttöaste on tapauksesta riippuen noin 20 prosenttia pienempi, kuin vanhan suunnitteluohjeen mukaan laskettu käyttöaste. Suurin yksittäinen ero käyttöasteiden suuruuksissa on liitoksen reunapuristuksessa, joka on aiemmin ollut mitoittavana kohtana suuri jännemittaisissa teräsputkissa.

Rakenneteräksen murtorajatilamitoituksessa on laskettu käyttöasteet kahdella toisistaan poikkeavalla periaatteella, kuten aiemmin mainittiin. Näitä tuloksia vertailtaessa voidaan todeta suunnitteluohjeeseen valitun kaavan (kaava 2.7) mukaisten käyttöastei-

den olevan tapauksesta riippuen noin 20 - 30 % - yksikköä pienempiä kuin eurokoodin mukaisella yhteisvaikutuskaavalla lasketut.

Väsytyksmitoituksen vertailulaskelmien mukaan matalilla peitesyvyyksillä ei ole mahdollista rakentaa teräsputkia ankarimpien liikenneluokkien teille. Uuden suunniteluohjeen mukaan lasketun pultin leikkauksen väsytykskestävyyden käyttöaste on kaikissa vertailulaskelmissa 0 %. Syy pieneen käyttöasteeseen on pultin verrattain suuri väsymisluokka leikkaukselle.

Käyttöasteiden perusteella voidaan todeta, että eurokoodin mukaan mitoitettut putkisillat eivät kestä matalilla peittösyvyyksillä kuin pienimpiä liikenneluokkia. Peittösyvyys kasvaessa yli yhden (1) metrin, ei väsytyksmitoitus ole koskaan määräävä. Huomion arvoista on liitoksen ja rakenneteräksen väsytykskestävyyksien suhteiden muutokset rakenteesta riippuen.

5.2 Poikkeavuudet Eurokoodeista

Teräsputkisillat ohjeen päivitettyssä versiossa on joitakin poikkeavuuksia eurokoodista. Kaikki poikkeavuudet on koottu tähän kappaleeseen.

1. Väsymysmitoituksessa käytetään teräsputken jännemitan mukaan joko varman kestämissen periaatetta ja pieniä seuraamuksia tai vaurion sietoperiaatetta ja pieniä seuraamuksia. Ohjeen mukainen yleinen käytäntö on käyttää varman kestämissen periaatetta ja suuria seuraamuksia.
2. Pultin normaalijännitykselle käytetään väsymisluokkaa 80. Standardin SFS-EN 1993-1-9 taulukon 8.1 mukainen väsymisluokka on 50.
3. Väsyttävän kuormakaavion FLM4 raskaiden ajoneuvojen jakaumaa on muokattu.
4. Kuormakaavioita LM1 ja LM2 voidaan pienentää 0 - 20 %, riippuen teräsputken jännemitasta.
5. Kuormakaaviota LM3 voidaan pienentää 20 %.
6. Rakenneteräksen normaalivoima ja taivutusmomentti voidaan laskea vanhan ohjeen mukaisella kaavalla.

5.3 Jatkotutkimustarpeet

Tämän diplomityön puitteissa ei ollut resursseja tutkia kaikkia tarpeellisia yksityiskohtia putkisillan toiminnassa. Aallotettujen teräsprofiilien pulttiliitosten toimintatavan selvittäminen käyttö- ja murtorajatilassa vaatii vielä lisätutkimuksia. Näiden tutkimusten perusteella olisi mahdollista optimoida liitoksessa käytettävät pulttimäärät.

Täydellinen selvitys liitosten toiminnasta edellyttäisi tutkimuksia ja koekuormituksia sekä staattisessa, että väsyttävässä tilassa. Tärkeää olisi tutkia kitkan vaikutusta liitoksessa ja pultin normaalivoiman suhdetta poikkileikkauksessa vallitsevaan taivutusmomenttiin. Liitteessä 4 on esitetty mahdollinen koejärjestely liitoksen toiminnan tarkempaa tutkimista varten.

Väsytyksmitoituksessa käytettävä rakennemalli on yksi mahdollinen tulkinta yhden tai usean akselin samanaikaisesta vaikutuksesta putkisillan päällä. Kuormakaavion FLM4 raskaiden ajoneuvojen vaikutusta putkisillan voimasuureisiin pitäisi tutkia vielä tarkemmin kuin tässä diplomityössä on tehty. Tarkempi tutkimustyö vaatisi täysin toimivan FEM-mallin luomista teräspuiskisillasta. Mallissa pitäisi pystyä huomioimaan usean akselin samanaikainen vaikutus teräspuiskkeen.

Pienempiä jatkotutkimustarpeita on mahdollinen väsytyksmitoituksen päivitys, mikäli Liikennevirasto julkaisee päivitetyn akselimassatutkimuksen.

LÄHTEET

Akselimassatutkimus 1998 - 1999. 2000. Helsinki, Tiehallinto. 275 s.

Chatzis, M., Tirkkonen, T. & Lilja, H. 2010. Fatigue loads in eurocodes for steel and composite bridges: an approach oriented to Finland's road network. 9 p.

Eurokoodin sovellusohje Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1. 2010. Helsinki, Liikennevirasto. 104 s.

Flener, E. B. 2004. Field Testing of a Long-span Arch Steel Culvert Railway Bridge over Skivarpsån, Sweden. Part II. Raport 84, Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm. 121 p.

Flener, E. B. 2005. Field Testing of a Long-span Arch Steel Culvert Railway Bridge over Skivarpsån, Sweden. Part III. Raport 84, Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm. 99 p.

Jeun, S & Rhee, J. 2007. An Experimental Verification of the Improved Bolting Arrangement. Seminaari julkaisu ss. 109-119.

Jussila, A. 2007. Aallotettujen teräsputkisiltojen mitoittaminen. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. 63 s. + 7 liites.

Mohammed, H. & Kennedy, J. 2009. Fatigue resistance of corrugated Steel Sheets Bolted Lap Joints under Flexure. Practice Periodical on Structural Design and Construction @ ASCE, November 2009. pp. 242-245.

Outinen, H., Koski, J. & Salmi, T. 2000. Lujuusopin perusteet. 2. Painos. Tampere, Pressus Oy. 560 s.

Pettersson, L. 2007. Full scale Tests and Structural Evalution of Soil Steel Flexible Culverts with low Height of Cover. Stockholm. Kungliga Tekniska högskolan. 246 p.

Pettersson, L. & Sundqvist, H. 2010. Design of soil steel composite bridges. 4th Edition. Stockholm. Kungliga Tekniska högskolan. 75 p.

SFS-EN 1993-1-1. 2006. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki, Suomen standarditoimistoliitto SFS. 100 s.

SFS-EN 1993-1-8. 2006. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu. Helsinki, Suomen standarditoimistoliitto SFS. 149 s.

SFS-EN 1993-1-9. 2006. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Teräsrakenteiden väsyminen. Helsinki, Suomen standarditoimistoliitto SFS. 42 s.

SFS-EN 1993-2. 2010. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 2: Terässillat. Helsinki, Suomen standarditoimistoliitto SFS. 103 s.

Siltojen kuormat. 1999. Helsinki, Tiehallinto. 32 s.

Temporal, J., Barret, D. A. & Hunnibell, B. E. F. 1985. Loading tests on an Armco pipe arch culvert. Transport and Road Research Laboratory, Research Report no 32. UK. 28 p.

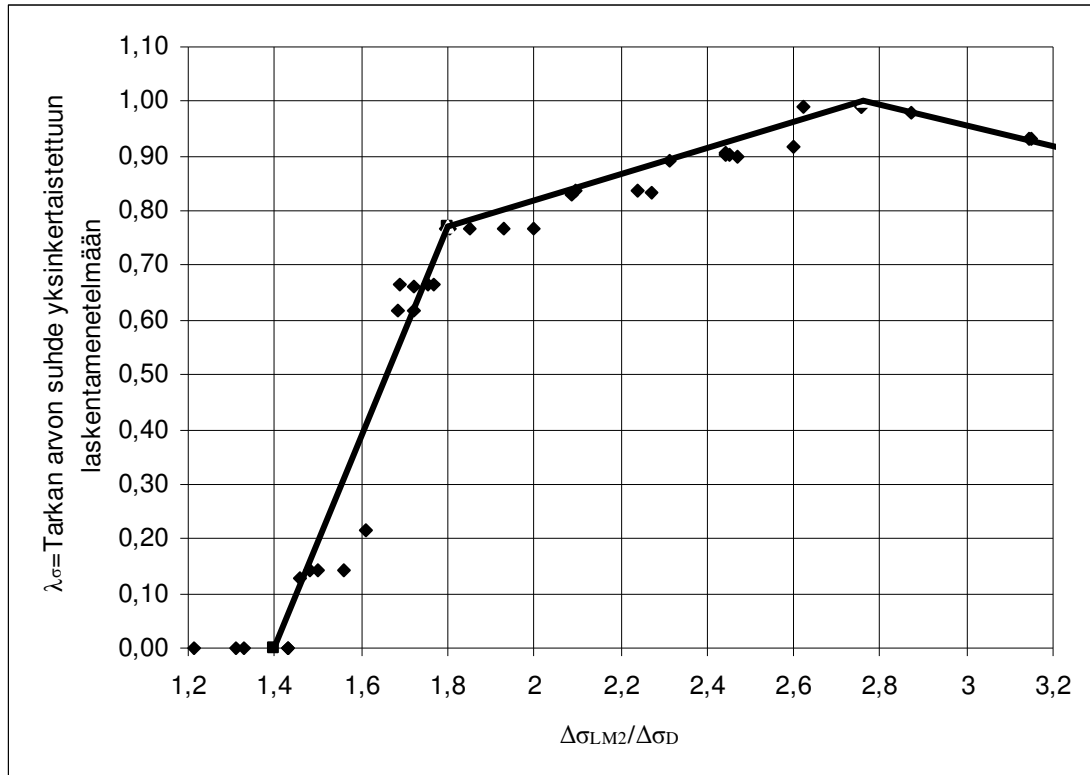
Teräsputkipaalut. 1999. Helsinki, Tiehallinto. 81 s.

Teräsputkisillat. 2008. Helsinki, Tiehallinto. 70 s.

Tuomala, M. 2008. Plastisuusteoria luentomoniste. Tampere. 297 s.

Liite 1: λ_σ -KERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN

Kertoimen λ_σ määrittämistä varten on laskettu väsymiskestävyyden tarkkoja käyttöasteen arvoja Minerin kumulatiivisella vaurioteorialla. Tätä tarkkaa arvoa on verrattu yksinkertaistetun laskentamenetelmän samoilla lähtöarvoilla antamiin käyttöasteisiin. Näiden käyttöasteiden suhde on esitetty y-akselilla. X-akselilla on esitetty suurimman jännityksen suhde vakioamplitudisen väsymisrajan suunnitteluarvoon. Pisteiden perusteella on piirretty paloittain lineaarinen kuvaaja, jonka avulla kerroin λ_σ valitaan.

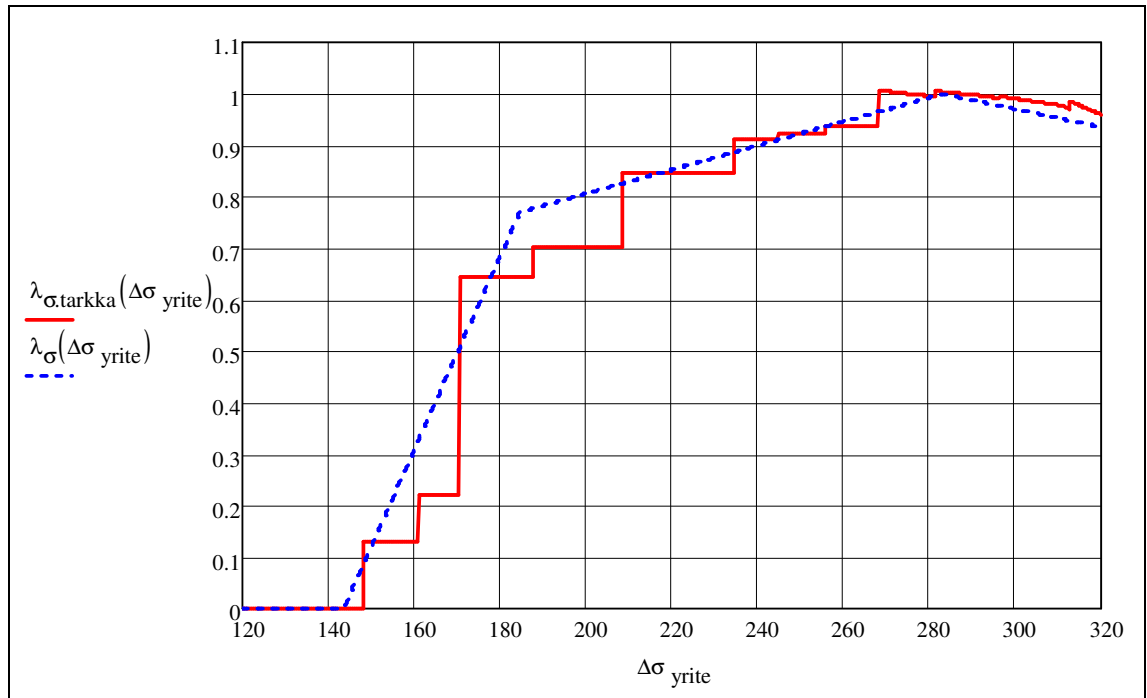


Kuva L1.1. λ_σ -kertoimen määrittäminen (Julku 2011)

Kuvan L1.1. oikeellisuuden varmistamiseksi on määritetty suhde tarkalla Minerin kumulatiivisella vaurioteorialla lasketun ja tässä diplomityössä esitetyn yksinkertaistetun väsytykskestävyyden laskentamenetelmän (kaava 3.10) välille. Kuvissa L1.2. ja L1.3. on esitetty sinisellä katkoviivalla kerroin λ_σ ja yhtenäisellä punaisella viivalla on merkitty edellä mainittua suhdetta yksinkertaistetun ja tarkan laskentamenetelmän välillä.

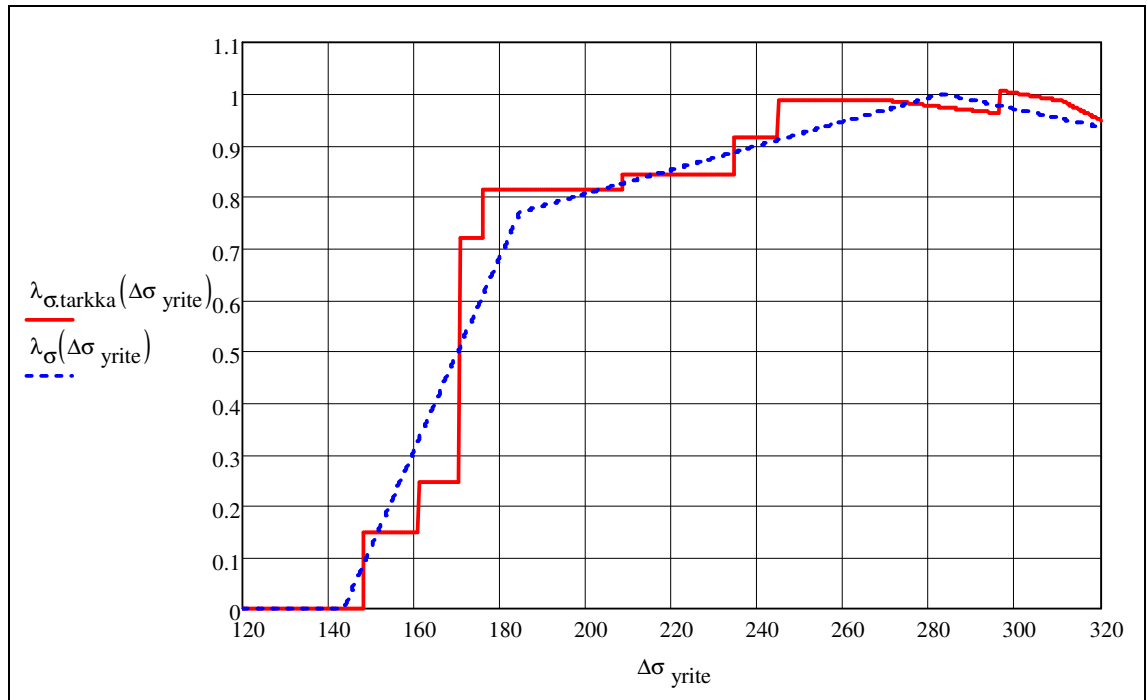
Kuvista L1.2. ja L1.3. nähdään miten tarkan laskennan ja yksinkertaistetun menetelmän välinen ero alkaa voimakkaasti pienentyä kun kuormakaavion LM2 aiheuttama jännitysvaihteluväli ylittää arvon 140 MPa. Kuvaajissa olevat selvät hyppäykset syntyvät, kun jonkin jännitysvaihteluvälin intensiteetti ylittää alemman tai vakioamplitudisen väsymisrajan. Kuvassa L1.3 peitesyvyys on 0,55 metriä ja kuvassa L1.3 1,0 metriä.

Kuvien L1.2. ja L1.3. mukaisia kuvaajia on tämän diplomityön yhteydessä piirretty lukuisia. Kaikissa tapauksissa kertoimen λ_σ arvo ja tarkka suhdekuvaaja ovat osuneet kuvissa näkyvällä tarkkuudella yhteen.



Kuva L1.2. λ_{σ} -kertoimen tarkistaminen, kun $h_c=0,55$ m (Julku 2011)

Lopullisten mitoitusperusteiden järkevyyden tarkistamista varten tehtiin vertailulas-
kelmia diplomityön loppuvaiheessa. Näissä tarkistettiin myös erot tarkan väsyysmitoi-
tuksen ja yksinkertaistetun kaavan välillä. Erot näiden välillä johtuvat ainoastaan tässä
liitteessä esitetyn kertoimen johtamisesta, sillä kaikki muu on yksinkertaistetussa las-
kentamenetelmässä johdettu matemaattisesti. Erot laskentatapojen välillä olivat välillä
-5 % - 10 %. Tarkimmillaan yksinkertaistettu menetelmä on matalilla peitesyvyyksillä.
Paksummilla peitesyvyyksillä kaava antaa konservatiivisempia arvoja. Kerroin λ_{σ} toimii
siis järkevästi antaen tarkimmat arvot mitoittavimmissa tapauksissa ja muuttuu konser-
vatiivisemmaksi, kun väsytyks ei ole enää mitoittava.



Kuva L1.3. λ_{σ} -kertoimen tarkistaminen, kun $h_c=1,0$ m (Julku 2011)

Liite 2: AKSELIKOHTAISET KUORMAKERTOIMET VÄSYTYSMITOITUKSESSA

Tähän liitteeseen on kerätty tarvittavat tiedot yksinkertaistetussa väsytysmitoituksessa käytettävän λ_n -kertoimen laskemiseksi uudelleen. Tarve määrittää edellä mainittu kerroin uudelleen voi syntyä, jos Liikennevirasto julkaisee uuden akselimassatutkimuksen.

Taulukkoon L2.1 on merkitty tunnuksella a telikuormasta aiheutuvan kuorman maksimiarvoa ja tunnuksella b telikuormasta aiheutuvan kuorman vaihtelun minimiarvoa. Telikuormien maksimi- ja minimiarvoja on käsitelty tarkemmin kohdassa 3.4 ja liitteessä 5.

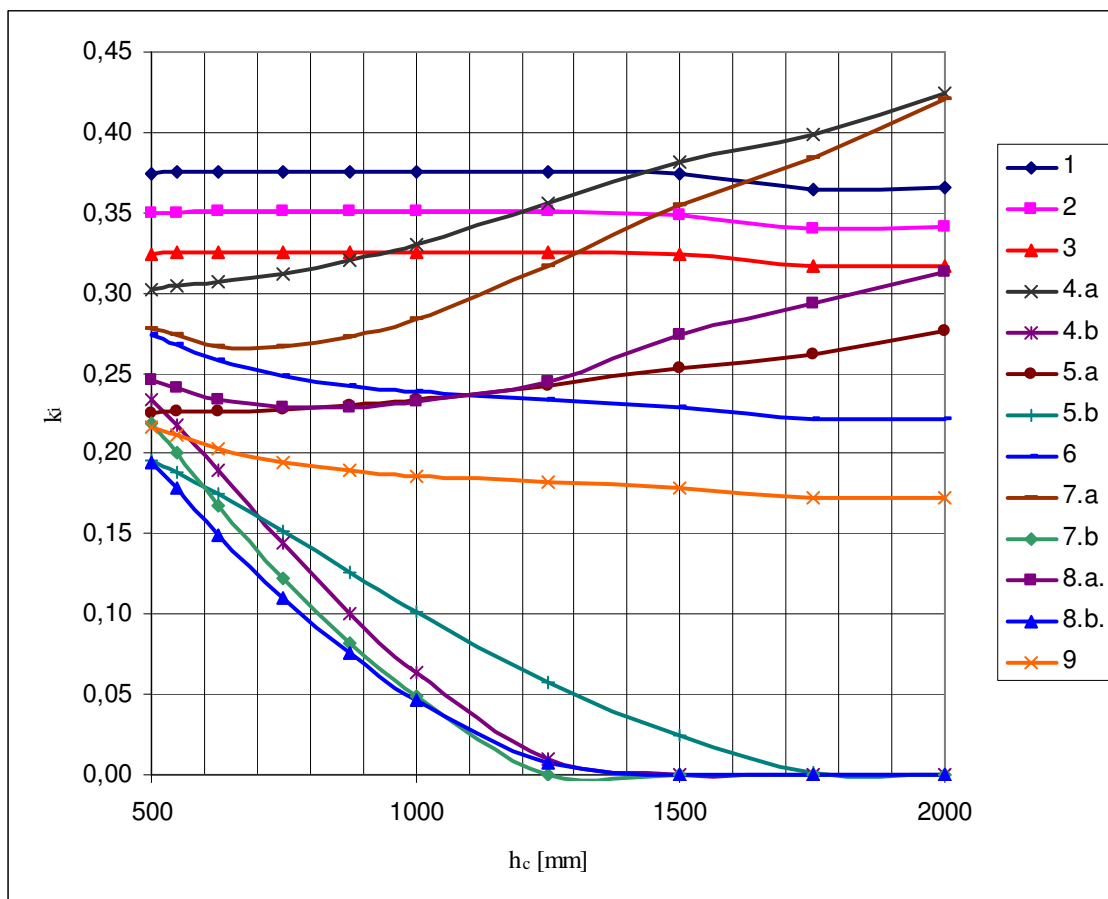
Taulukko L2.1 Jännitysvaihteluvälien kertoimia akseli- ja telikuormille (Julku 2011)

Tapaus	Akseli/Teli	Kuormityksen tyyppi	F [kN]	Renkaan kosketusala ⁽¹⁾	Raskasajoneuvo, jossa esiintyy ⁽²⁾	h_c [mm]									
						500	550	625	750	875	1000	1250	1500	1750	2000
						500	550	625	750	875	1000	1250	1500	1750	2000
1	Akseli		150	B	3	0,374	0,375	0,376	0,376	0,376	0,376	0,376	0,374	0,365	0,366
2	Akseli		140	B	4	0,349	0,350	0,350	0,351	0,351	0,351	0,350	0,349	0,341	0,341
3	Akseli		130	B	1, 5	0,325	0,325	0,325	0,326	0,326	0,326	0,325	0,324	0,316	0,317
4.a	Teli		120	B	2	0,302	0,304	0,307	0,312	0,320	0,330	0,355	0,382	0,399	0,424
4.b	Teli	Telikuorman aiheuttama pienempi jännitysvaihteluväli ⁽³⁾				0,233	0,217	0,190	0,144	0,101	0,064	0,010	0	0	0
5.a	Teli		90	B	4	0,225	0,226	0,227	0,228	0,230	0,233	0,242	0,253	0,261	0,277
5.b	Teli	Telikuorman aiheuttama pienempi jännitysvaihteluväli ⁽³⁾				0,196	0,188	0,175	0,151	0,126	0,101	0,058	0,025	0,001	0
6	Akseli		90	C	5	0,274	0,268	0,258	0,248	0,242	0,238	0,233	0,229	0,222	0,222
7.a	Teli		90	C	3	0,278	0,274	0,267	0,266	0,272	0,284	0,317	0,354	0,384	0,420
7.b	Teli	Telikuorman aiheuttama pienempi jännitysvaihteluväli ⁽³⁾				0,219	0,200	0,168	0,122	0,082	0,049	0	0	0	0
8.a	Teli		80	C	5	0,245	0,241	0,233	0,229	0,229	0,232	0,244	0,273	0,293	0,313
8.b	Teli	Telikuorman aiheuttama pienempi jännitysvaihteluväli ⁽³⁾				0,195	0,178	0,150	0,109	0,075	0,047	0,008	0	0	0
9	Akseli		70	A	1,2,3,4,5	0,217	0,212	0,203	0,195	0,189	0,186	0,182	0,179	0,173	0,173

⁽¹⁾ Renkaan kosketusala taulukon 3.2. mukaan
⁽²⁾ Raskaiden ajoneuvojen tyypit on esitetty taulukossa 3.1.
⁽³⁾ Telikuorman aiheuttamat jännitysvaihteluvälit

Taulukon L2.1. arvot on esitetty graafisesti kuvassa L2.1. Taulukon L2.1. arvoja voidaan käyttää, jos renkaiden kosketuspinta-alat tai telikuormien akselivälit eivät muutu. Jos akseleiden painot muuttuvat, voidaan kertoimia skaalata suoraan painojen suhteen.

Taulukon L2.1 ja kuvan 2.1 kertoimilla voidaan laskea väsytyskuormakaavion FLM4 tyyppisten raskaiden ajoneuvojen akseleiden ja telien ekvivalentit viivakuormat sekä jännitysvaihteluvälit. Näiden laskeminen edellyttää, että kuormakaavion LM2 ekvivalentti viivakuorma ja jännitysvaihteluväli tunnetaan.



Kuva L2.1. Taulukon L2.1. arvot graafisessa muodossa (Julku 2011)

Esimerkki Taulukon L2.1 soveltamisesta käytännössä:

Tapauksen 5 kaltaisen telikuorman jännitysvaihteluvälit halutaan laskea telille, jonka akselikuorman suuruus on 160 kN. Renkaan kosketuspinnan ja telin akselivälin pitää säilyä muuttumattomina. Lasketaan uudet kertoimet peitesyvyydellä 750 mm. Muunnos voidaan tehdä lineaarisesti.

Maksimiarvo:

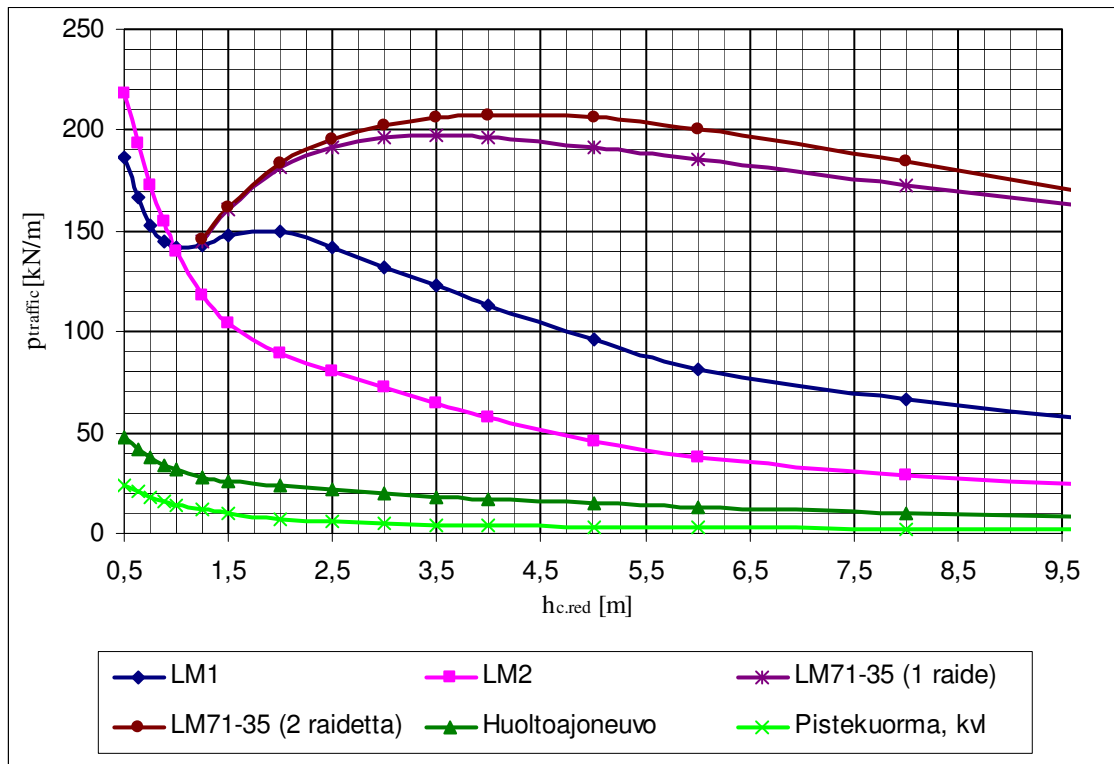
$$k_{i, \max. 160 \text{ kN}} = 0,312 \cdot \frac{160 \text{ kN}}{120 \text{ kN}} = 0,416$$

Minimiarvo:

$$k_{i, \min. 160 \text{ kN}} = 0,144 \cdot \frac{160 \text{ kN}}{120 \text{ kN}} = 0,192$$

Liite 3: Ekvivalentit viivakuormat

Julkaistavaa Aallotettujen teräspuutkissiltojen suunnitteluohjetta varten määritettiin valmiit ekvivalenttien viivakuormien p_{traffic} -kuvaajat. Kuvaajat on laskettu kaikille kuormakaavioille. Kuormakaavion LM1 mitoituksessa huomioitavan pinta-alakuorman suuruus on $9,0 \text{ kN/m}^2$. Tieliikenteensiltojen kuormakaavioissa on huomioitu dynaamisen lisän pienennys, kun peitesyvyys on enemmän kuin kaksi (2) metriä.

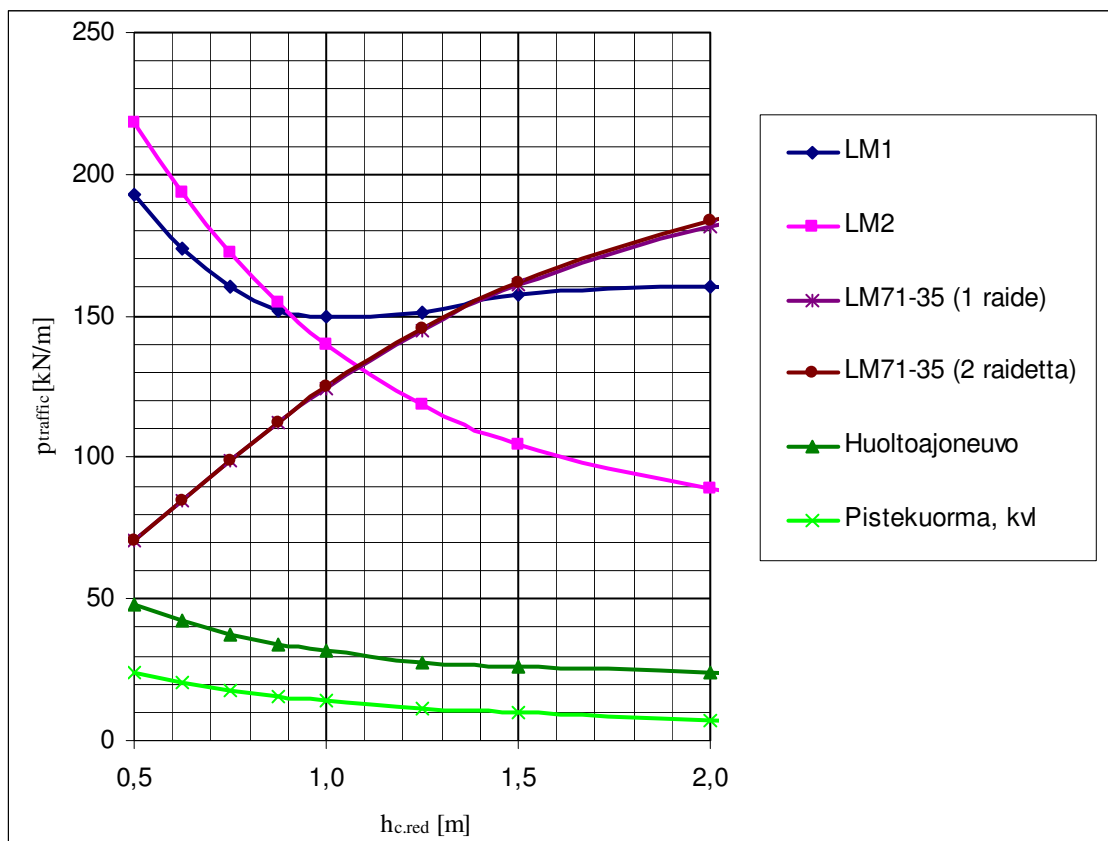


Kuva L3.1 Ekvivalentit viivakuormat peitesyvyyden funktiona (Julku 2011)

Kuvassa L3.1 on esitetty seuraavat kuormakaaviot:

1. LM1, eurokoodin soveltamisohjeen mukaiset LM1:n kuormakaavion akseli-kuormat ($2 \cdot 300 \text{ kN}$) määräävällä kaistalla ja ($2 \cdot 200 \text{ kN}$) viereisellä kaistalla.
2. LM2, eurokoodin soveltamisohjeen mukainen LM2:n kuormakaavion akseli-kuorma (400 kN) yhdellä kaistalla.
3. LM71-35(1) RHK1, eurokoodin soveltamisohjeen mukainen LM71-35 akseli-kuormat yhdeltä raiteelta ilman sysäyslisää.
4. LM71-35(2) RHK1, eurokoodin soveltamisohjeen mukaisen LM71-35 akseli-kuormat kahdelta raiteelta ilman sysäyslisää. Raiteiden keskiöetäisyys on $4,5 \text{ m}$.
5. Huoltoajoneuvo, eurokoodin soveltamisohjeen mukainen kevyen liikenteen väylän huoltoajoneuvo
6. Pistekuorma, eurokoodin soveltamisohjeen mukainen kevyen liikenteen väylän pistekuorma

Raideliikenteen siltojen ekvivalentit viivakuormat on määritetty kaikissa tapauksissa raiteen keskilinjalla. Kuormana on kuormakaavion LM71-35 akselikuormat ilman syysäyslisiä. Mikäli raiteita on useita, viivakuorma p_{traffic} lasketaan määrävän raiteen akselikuormien keskipisteestä.

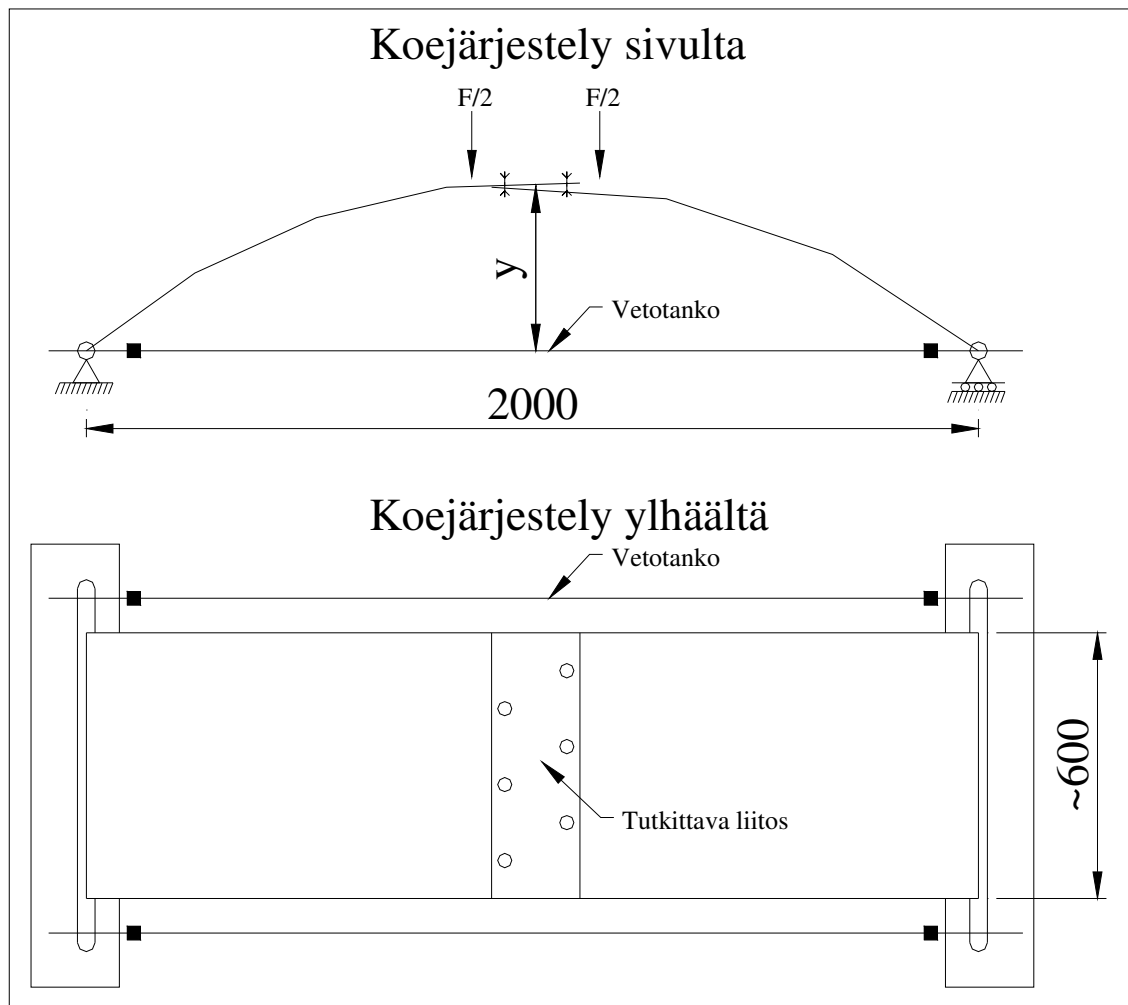


Kuva L3.2 Ekvivalentti viivakuorma pienillä peitesyvyyksillä (Julku 2011)

Kuvasta L3.1 nähdään ekvivalentin viivakuorman kehitys laajalla peitesyvyyksien alueella. Tätä kuvaa ei kuitenkaan kannata käyttää rasiusten laskennassa. Mitoitustehävissä on järkevämpi käyttää kuvaa L3.2, josta voidaan katsoa tarkemmin ekvivalentin viivakuorman arvot pienillä peitesyvyyksillä. Suotavaa olisi kuitenkin, että teräsputkisil-
lan rakennelaskelmia varten p_{traffic} -arvo laskettaisiin tapauskohtaisesti putken laella olevasta pohjapaineesta kaavalla 2.1.

LIITE 4: Koejärjestely liitoksen tutkimiseen

Putkisiltaohjeen uusimisen yhteydessä työryhmä pohti pulttiliitoksen todellista kestävyyttä reunarepeämän ja väsymiskestävyyden suhteen. Tämän diplomityön asettamissa ajan ja rahoituksen puitteissa ei ollut mahdollista kokeellisesti testata aallotettujen teräsputkien pulttiliitoksia. Työn puitteissa on kuitenkin mahdollista esittää koejärjestelyt, joilla voitaisiin tutkia kitkan vaikutusta pulttiliitoksen reunapuristuskestävyyteen, sekä liitoksen todellista herkkyyttä väsymisilmiölle. Koejärjestelyt on suunniteltu yhdessä Torsten Lunabban ja Jouko Selkämaan kanssa.



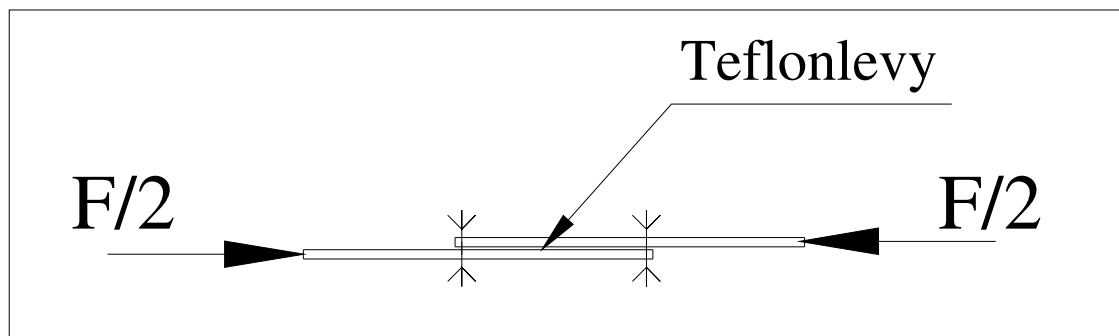
Kuva L4.1 Koejärjestelyt liitoksen tutkimiseksi (Selkämaa 2011)

Koejärjestelyt on suunniteltu siten, että liitokseen syntyvät rasitukset vastaisivat pienellä peitesyvyydellä olevaa teräsputkea, jota rasittaa FLM4-kuormakaavion raskaimmat akselit. Lisäksi koejärjestelyillä etsitään suurin profiilissa oleva normaalivoima, jolla pulttiliitoksen lepokitka ylittyy, sekä normaalivoima jolla pultin reiän reunarepeämä tapahtuu. Koejärjestelyn periaate on esitetty kuvassa L4.1.

Tavoitteena kuormitusjärjestelyssä on saada leikkaus- ja normaalivoiman suhteeksi kokeen ensimmäisessä vaiheessa 0,4. Toisessa vaiheessa on tarkoitus muuttaa kuormi-

tuksen kohtia siten, että edellä mainituksi suhteeksi tulee 0,8. Kolmannessa vaiheessa kuormitetaan liitos murtoon asti. Kahdessa ensimmäisessä vaiheessa kehän normaali-voima pysyy muuttumattomana. Normaalivoiman suuruus putkessa vastaa pulttien esijännityksen aiheuttamaa kitkavoimaa, joka on suuruudeltaan $0,4 \cdot 97 \text{ kN} = 38,8 \text{ kN}$.

Koe voidaan tehdä staattisena kuormituksena. Parempi informaatioarvo saadaan, jos koe tehdään väsyttävällä mallilla. Kahdessa ensimmäisessä vaiheessa kuormitus on toistuva. Jos koe tehdään väsyttävällä mallilla, voidaan samalla tutkia pultin väsymisluokkaa aallotetun teräsprofiilin liitoksessa.



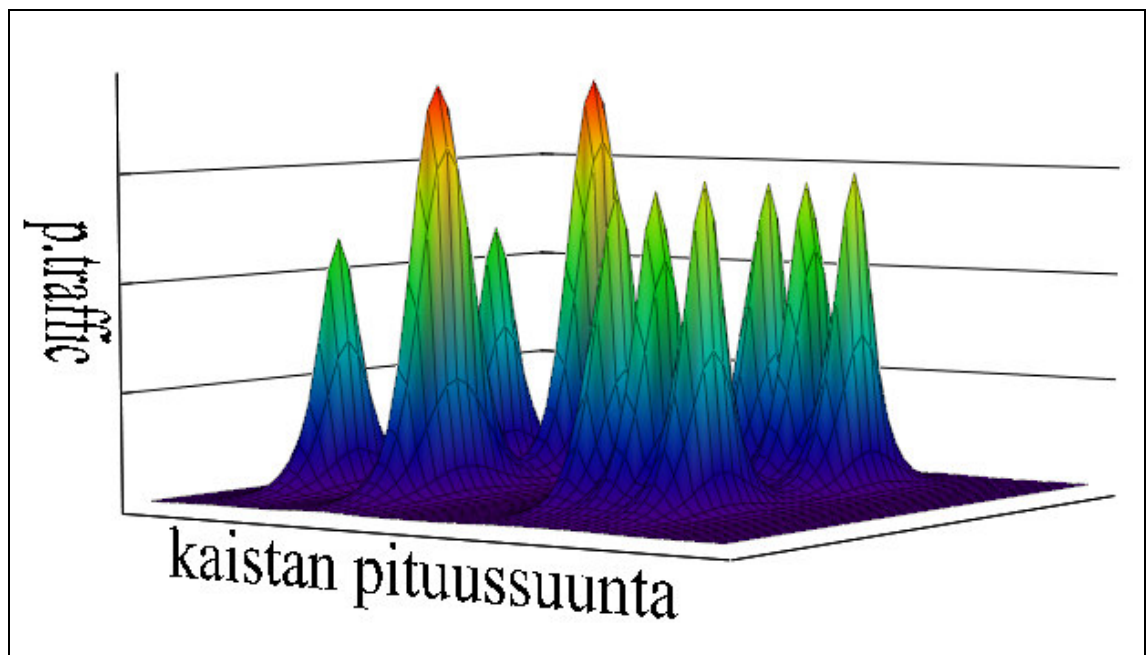
Kuva L4.2 Kevyempi koejärjestely (Julku 2011)

Koejärjestelyiden kevyemmässä versiossa, jonka periaate on esitetty kuvassa L4.2, tutkitaan ainoastaan liitoksessa vaikuttavaa kitkaa. Koe järjestetään kahdella (2) suoralla aallotetulla teräsprofiililla, jotka on liitetty toisiinsa 2-4 pultilla. Ensimmäisessä vaiheessa levyjen väliin laitetaan ohut teflonlevy, jonka kitkakerroin on 0,04. Toisessa vaiheessa vastaavat levyt liitetään toisiinsa ilman välimateriaalia. Molemmissa tapauksissa rakennetta kuormitetaan levyjen suuntaisella voimalla. Tarkoituksena on selvittää voima, jolla liitos liukuu sekä voima, jolla liitos murtuu. Tällä koejärjestelyllä ei kuitenkaan voida tutkia pultin väsymisluokkaa.

LIITE 5: Jännitysvaihtelut putken laella

Tässä liitteessä käsitellään teräsputkeen syntyviä jännityksiä mitoitusajoneuvon ylittäessä putkisiltaa. Näitä jännityksiä ja niiden vaihteluita tarvitaan reunapuristus- ja tarkan väsymiskestävyyden laskennassa. Tarkkaa väsymiskestävyyden arviointia tehtäessä pitää käsitellä kaikkia taulukon 3.1 raskaita ajoneuvoja. Diplomityön puitteissa on käsitelty kaikkia edellä mainitun taulukon ajoneuvoja. Tässä liitteessä käsitellään ainoastaan raskasta ajoneuvoa numero 3, joka muodostuu kahdesta (2) yksittäisestä akselistasta ja yhdestä kolmiakselisesta telistä. Yksi ajoneuvon numero 3 akseleista on kaikkein raskain taulukon 3.1 akseleista.

Kuvissa L5.1 ja L5.2 on esitetty ekvivalentin viivakuorman arvoja eri kohdissa mitoitusajoneuvoa. Näissä kuvissa on esitetty ekvivalentin viivakuorman vaihtelun tyyppi, kun peitesyvyyydet ovat 0,5 ja 1,0 metriä. Kuvista ei voida katsoa tarkkoja viivakuorman arvoja, mutta niiden perusteella voidaan havaita miten telikuormat vaikuttavat pienillä peitesyvyyksillä yksittäisinä ja kuinka ne alkavat vaikuttaa samanaikaisesti toistensa kanssa peitesyvyyden kasvaessa.

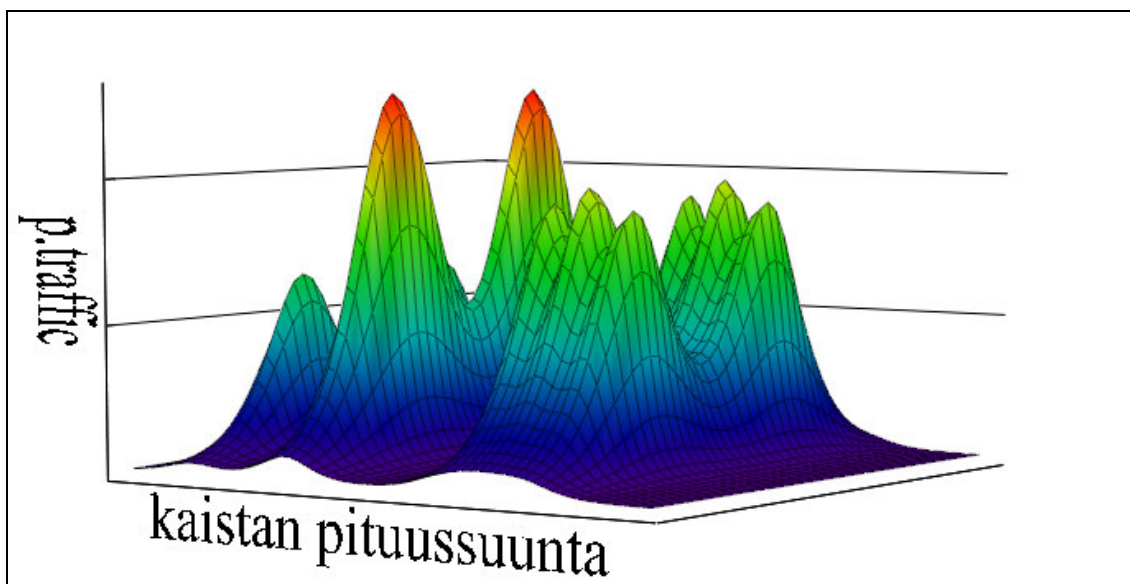


Kuva L5.1 Ekvivalentin viivakuorma taulukon 3.1 ajoneuvosta nro 3, kun $h_c=0,5m$ (Julku 2011)

Kuvien L5.1 ja L5.2. perusteella yksinkertaisessa väsytysoitoituksessa on huomioitu telikuormien yhteisvaikutus, mutta ei yksittäisten akseleiden yhteisvaikutusta. Tällä valinnalla on mahdollista päästä järkevään tasapainoon laskentamenetelmän käytettävyyden ja tarkkuuden välillä.

Mitoitusajoneuvon ylittäessä teräsputkisiltaa, syntyy putken laelle jännitysvaihteluväli. Yksittäisestä akselistasta syntyvän jännitysvaihteluvälin otaksutaan Petterssonin väitöskirjan (2007) mukaan olevan puolitoistakertainen taivutusmomentin aiheuttamaan

jännitykseen nähden. Petterssonin käyttämä laskentaperiaate ei ota huomioon useampaa samanaikaisesti teräsputkisillan päällä olevaa akselia. Samanaikaisesti teräsputkeen vaikuttavat akselit voivat sekä kasvattaa, että pienentää jännityshuippuja. Jännityshuipun muutoksen suuntaan vaikuttaa putken jännemitan suhde akseleiden jännemittaan kuvan 3.1 osoittamalla tavalla.



Kuva L5.2 Ekvivalentin viivakuorma taulukon 3.1 ajoneuvosta nro 3, kun $h_c=1,0m$ (Juli 2011)

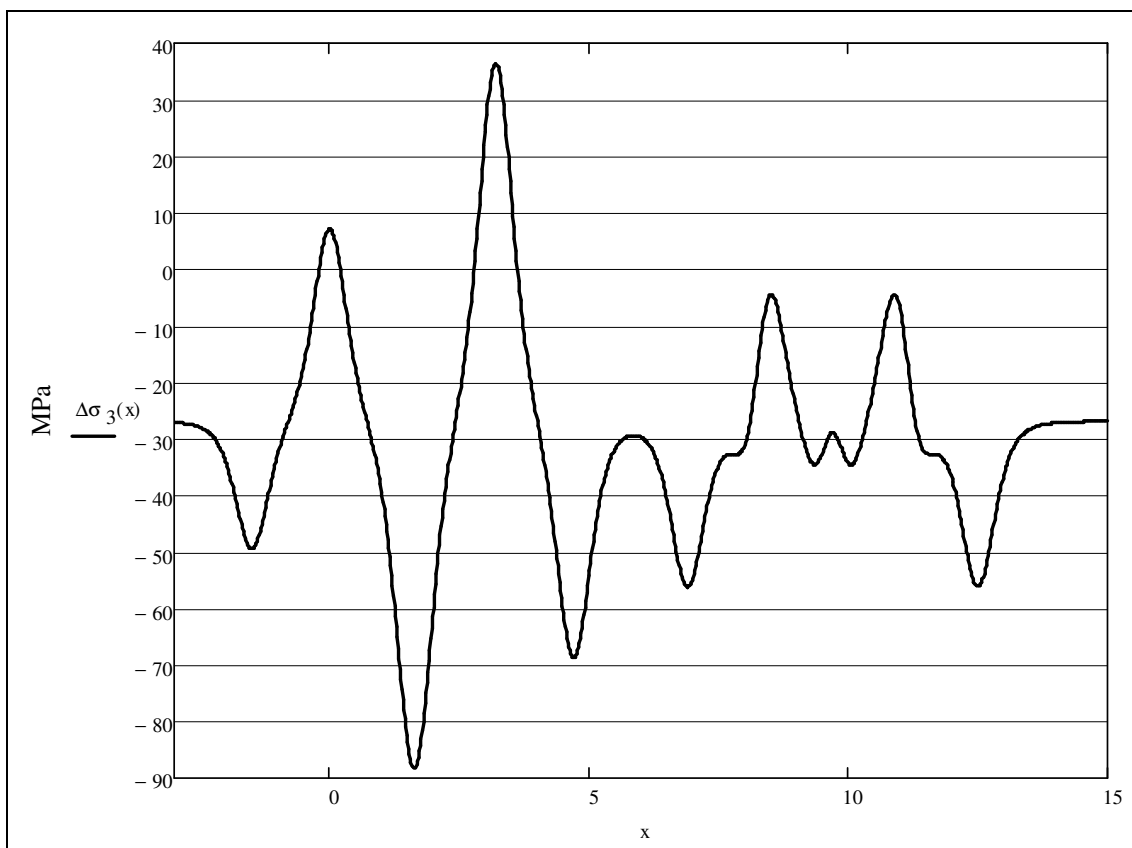
Pettersson ei ole väsyttävien voimasuureiden laskennassa huomioinut lainkaan liikennekuorman aiheuttaman normaalivoiman muutoksia. Muutoksia ei ole huomioitu, sillä oletuksena on, että liikennekuorma aiheuttaa putkeen aina tasaisen puristavan normaalivoiman. Akselin ylittäessä putken, normaalivoiman arvo muuttuu nolasta maksimiin. Tämän muutoksen nopeutta ei kuitenkaan ole tutkittu tarkemmin.

Kuvissa L5.3 ja L5.4 on esitetty raskaan ajoneuvon aiheuttama laskennallinen jännitysvaihtelu. Tässä laskennallisessa jännitysvaihtelussa on oletettu akselin aiheuttavan negatiivisen taivutusmomentin jonka suuruus on puolet täydestä taivutusmomentista, kun akseli on putken reunan kohdalla. Akselin aiheuttaman normaalivoiman oletetaan saavuttavan maksimiarvonsa, kun akseli on putken laen kohdalla. Tähän maksimiarvoon normaalivoima kasvaa lineaarisesti akselin lähestyessä putken lakea. Jännitysvaihtelun lähtötason määrittää ympäröivän maan paino.

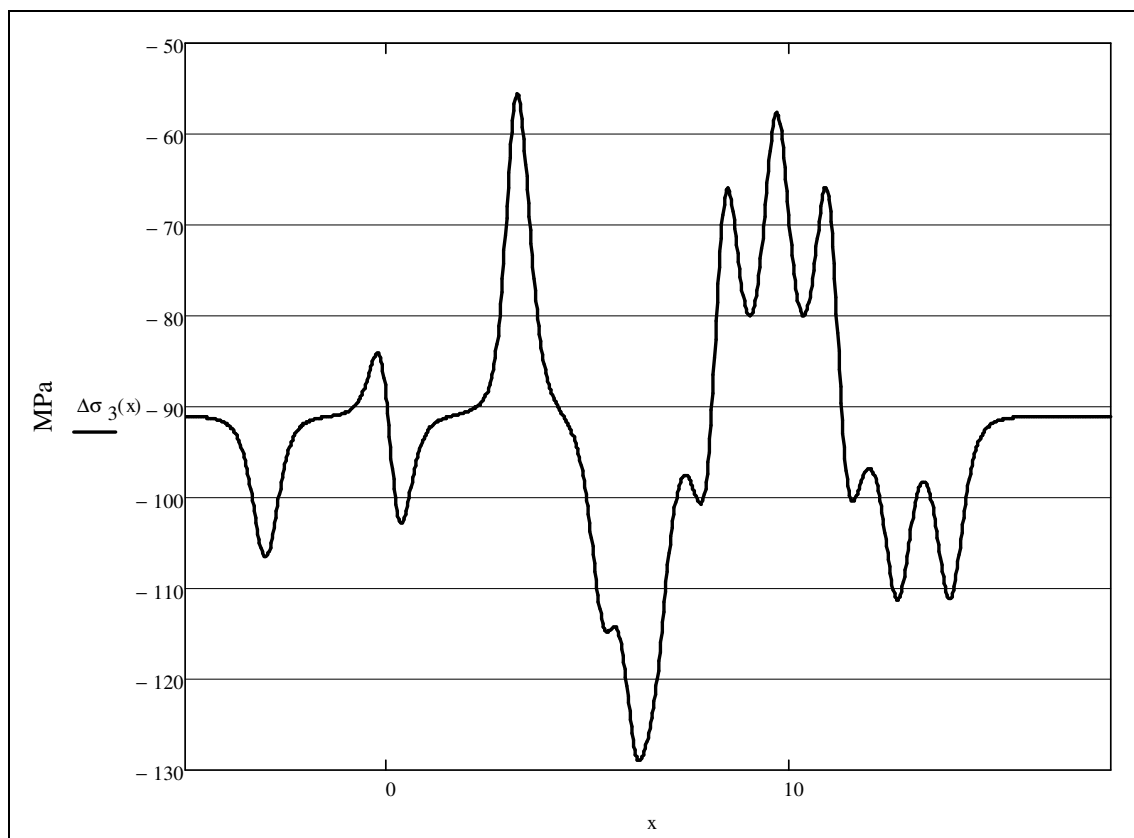
Kuvien L5.3 ja L5.4 välillä voidaan huomata miten putken jännemitta vaikuttaa jännitysvaihteluihin. Jännitysvaihtelukuvaajien malli on täysin riippuvainen teräsputken jännemitasta ja mitoitusajoneuvon akseleiden painoista, sekä niiden keskinäisistä etäisyyksistä. Jännitystasoihin vaikuttaa myös valittu profiili ja sen poikkileikkauksen ominaisuudet.

Diplomityön kohdassa 2.4.6 on käsitelty liitoksen reunapuristuskestävyyttä. Samassa kohdassa on mainittu, että pultin reunarepeämistä ei tarvitse tarkistaa, jos putkessa vallitsee puristava normaalivoima. Kuvan L5.4 tapauksessa teräsputki on kokonaan pu-

ristettu, mutta kuvan L5.3 pienempään teräsputkeen syntyy myös vetojännityksiä mitoitussajoneuvosta. Kuvan L5.3 tapauksessa pultin reunarepeytyminen tulee tarkistaa jännityksen huippuarvoa vastaavalle voimalle.



Kuva L5.3. Jännitysvaihtelu taulukon 3.1 ajoneuvosta 3, kun $D=3\text{m}$ ja $h_c=625\text{mm}$ (Joulku 2011)



Kuva L5.4. Jännitysvaihtelu taulukon 3.1 ajoneuvosta 3, kun $D=6\text{m}$ ja $h_c=625\text{mm}$ (Joulku 2011)

